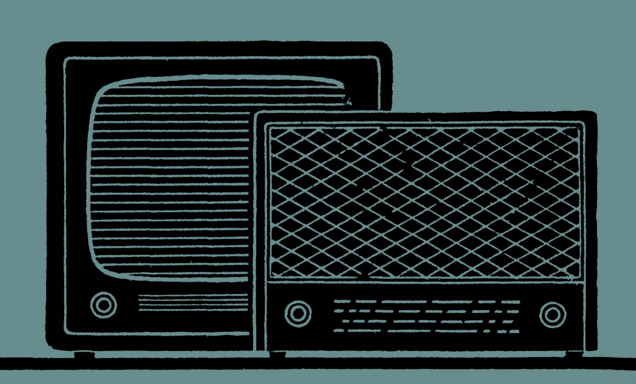
Я. М. Сорин



Надежность радиоэлектронной аппаратуры



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 406

Я. М. СОРИН

НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В брошюре излагается в популярной форме сущность проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры, показывается ее государственное и народнохозяйственное значение, рассматриваются возможные пути ее решения, дается обзор состояния надежности за рубежом

Брошюра рассчитана на широкий круг работников радиоэлектронной промышленности, приборостроения и радиолюбительский актив.

6Ф2. *Сорин Яков Михайлович*

С 65 **Надежность радиоэлектронной аппаратуры,**

М.-Л., Госэнергоиздат, 1961

72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 406)

6Ф2

Редактор: *Лебедев А. В.* Техн. редактор *М. М. Широкова*

Сдано в пр-во 22/II 1961 г. Подписано к печати 29/IV 1961 г.
Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$ 3,69 печ. л. Уч.-изд. л. 3,9
Т-05902. Тираж 46 000 Цена 16 коп. Зак. 94

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкие, по существу неограниченные перспективы применения радиоэлектроники во всех отраслях науки и техники поставили на первый план необходимость решения проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры и всех используемых в ней элементов и материалов.

Советские конструкторы и радиолюбители в процессе разработки своих конструкций всегда исходили из необходимости обеспечения наиболее высокой надежности, но до последнего времени это делалось опытным путем или по интуиции, без каких-либо расчетов надежности работы конструкций.

В то же время вопросы надежности давно интересовали советских ученых. Еще с 1946 г. в нашей печати начали появляться различные статьи и книги, посвященные вопросам надежности и точности.

Следует отметить оригинальные работы советских авторов А. В. Астафьева, Ш. Л. Бебиашвили, Н. Г. Бруевича, Г. В. Дружинина, Б. Р. Левина, И. И. Морозова, М. А. Синицы, В. И. Сифорова и многих других.

На этой основе советскими учеными и инженерами были разработаны методы расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры и методика ее испытаний.

В последние годы на многих предприятиях созданы отделы или группы, специально занимающиеся вопросами повышения, расчета и испытания надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Вопросы повышения надежности, долговечности и точности работы радиоэлектронной техники все больше начинают интересовать широкие круги радиолюбителей. У нас нет ни одного промышленного предприятия, где

бы не развивалось радиолюбительство. Радиолюбители могут и должны сыграть важную роль в успешном решении проблемы надежности.

После июньского Пленума ЦК КПСС 1959 г. и июльского Пленума 1960 г. где было уделено большое внимание повышению качественных показателей в работе промышленности и транспорта вопросы надежности приобрели еще большее значение.

Успехи Советского Союза в освоении космоса стали возможными только благодаря тому что наши ученые инженеры, техники и рабочие научились разрабатывать и изготовлять надежно работающую технику.

Только высоконадежная работа изделий радиоэлектроники и автоматики при всех прочих условиях сделают возможными безопасный полет человека в космос и его возвращение на землю.

Решение проблемы повышения надежности не может быть достигнуто одними директивными или административными мерами. Здесь необходимо широкое участие всей нашей партийной профсоюзной и комсомольской общественности и в первую очередь миллионного коллектива советских радиолюбителей работающих в различных отраслях народного хозяйства

Понимание сущности этой проблемы и проникновение в сознание каждого советского человека важности повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры имеет первостепенное значение. Этой задаче и посвящена настоящая брошюра.

В последнее время у нас появился ряд печатных работ по вопросам надежности. Эти работы в своем большинстве освещают лишь отдельные вопросы проблемы надежности и по своему изложению рассчитаны на ограниченный круг читателей. В данной брошюре делается попытка обобщить имеющиеся материалы и дать по возможности цельное представление о значении и содержании проблемы надежности в популярной форме, доступной широкому кругу работников радиоэлектронной промышленности и радиолюбительскому активу.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Если мы заглянем в Большую Советскую Энциклопедию и посмотрим, что такое «качество продукции», мы прочтем там следующее определение:

«Качество продукции — это совокупность свойств продукции, определяющих степень ее пригодности для использования по назначению».

Иными словами, качество продукции представляет собой совокупность показателей, определяющих ее соответствие современным требованиям техники и быта.

К важнейшим качественным показателям продукции относятся надежность, долговечность и точность работы, обеспечиваемые в процессе эксплуатации изделия.

Эти показатели имеют численное выражение и по существу определяют эффективность применения любых приборов, механизмов и систем во всех отраслях техники.

Требования к качеству продукции устанавливаются государственными стандартами, а при отсутствии их — соответствующими ведомственными техническими условиями.

Продукция, не соответствующая утвержденным стандартам и признанная недоброкачественной, не должна засчитываться при определении выполнения плана выпустившего ее предприятия.

Руководители предприятий и другие должностные лица, виновные в выпуске недоброкачественной продукции, несут за это строгую личную ответственность.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют большое внимание качеству продукции, ибо ка-

чество продукции непосредственно влияет на благосостояние советского народа.

На необходимость всемерного повышения качества продукции указывалось в решениях Съездов партии, в постановлениях июньского Пленума 1959 г. и особенно июльского Пленума ЦК КПСС 1960 г.

Из всех качественных показателей мы будем здесь рассматривать лишь надежность.

Что же такое надежность?

К сожалению, определения понятия «надежность изделия» в Большой Советской Энциклопедии мы не найдем. И это не случайно. Надежности промышленных изделий, в частности радиоэлектронной аппаратуры, стало придаваться должное значение лишь в последние годы.

Попробуем поэтому сами ответить на поставленный вопрос.

Допустим, мы решили купить телевизор. В магазине имеются телевизоры различных типов. Какой из них выбрать?

Естественно, что нам хотелось бы — в пределах наших возможностей — купить телевизор, обладающий самым высоким качеством. Мы долго и придирчиво рассматриваем все выставленные образцы телевизоров, читаем их описания, сравниваем их качественные показатели.

Наконец, выбор сделан. Телевизор куплен, доставлен домой, установлен, и мы каждый вечер с удовольствием включаем его, чтобы посмотреть новую театральную постановку, прослушать интересный концерт, узнать последние новости.

Но проходит некоторое время и вдруг телевизор перестает действовать. Вызванный из ателье мастер устраняет неисправность, и телевизор вновь работает нормально... до очередной, часто очень скоро наступающей неисправности или, как говорят, «отказа».

Мы начинаем задумываться: очевидно, при выборе телевизора мы не учли каких-то очень важных показателей его качества. Каких же? Вот здесь мы и сталкиваемся с понятием «надежность» изделия.

Что же такое надежность? Под надежностью работы изделия понимается обычно его способность безот-

казно выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации и времени.

Мы уже говорили, что надежность является одним из показателей качества. К показателям качества, например, телевизора, кроме его надежности, относятся красота его внешней отделки, размер экрана, количество принимаемых программ и ряд других показателей.

Однако на собственном опыте мы убедились, что если надежность и является лишь одним из показателей качества продукции, то применительно к более сложным видам продукции — аппаратам, устройствам, используемым в динамике, т. е. в процессе их работы, надежность становится важнейшим, решающим показателем качества и приобретает самостоятельное значение.

Действительно, какое значение могут иметь изящная внешняя отделка, большой экран и прочие высокие показатели качества купленного нами телевизора, если он работает ненадежно, если большую часть времени он бездействует?

Чем больше усложняются используемые нами предметы культурно-бытового и народнохозяйственного назначения, тем большее значение приобретает надежность их работы, тем чаще она становится основным критерием, определяющим эффективность применения данного изделия и всех других технических средств.

Выступая 5 мая 1960 г. на 5-й сессии Верховного Совета СССР, Н. С. Хрущев говорил: «Об изделиях советской промышленности должна быть хорошая слава. Давайте поднимем на щит тех, кто дает продукцию отличного качества, и усилим борьбу против бракоделов, против тех, кто небрежно, без любви к делу выпускает изделия, которые приносят не радость, а огорчение советским людям».

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЗНАЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ В БЫТУ СОВЕТСКОГО ЧЕЛОВЕКА, НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Благодаря неустанным заботам партии и правительства благосостояние нашего народа непрерывно повышается. Растет и развивается наша промышленность, дающая населению все большее количество товаров ши-

рокого потребления различного ассортимента и высокого качества.

Семилетним планом предусмотрено наряду с резким увеличением продажи насслению продуктов питания еще более значительное увеличение продажи технических средств культурно-бытового и хозяйственного назначения.

Так по сравнению с прошлым семилетием продажа населению телевизоров должна увеличиться в 4,6 раза, радиоприемников и радиол — в 1,8 раза.

Только в послевоенные годы населением нашей страны было приобретено около 25 млн. радиоприемников.

За последние 5 лет количество телевизоров в стране выросло с 450 тыс. до 5 млн., а к 1965 г. их количество превысит 15 млн.

Естественно, что выполнить свое назначение вся эта аппаратура может только при условии надежной и долговечной работы.

Нужно ли говорить, сколько огорчений, разочарований, справедливых обид вызывают у советской семьи частые неисправности, быстрый выход из строя, необходимость многократных ремонтов телевизоров, приемников, радиол и других бытовых приборов.

Однако надежность многих промышленных изделий, в том числе и радиоэлектронной аппаратуры, часто далеко не отвечает законным требованиям советского человека.

Это вынуждает промышленность гарантировать населению бесплатный ремонт выпускаемых радиотехнических изделий в течение определенного периода. Для ремонта телевизоров создано большое количество телевизионных ателье с соответствующим штатом техников и запасом различных материалов и деталей Содержание этих ателье требует больших средств, исчисляемых многими десятками миллионов рублей.

Такова «цена ненадежности» одних только телевизоров. Но ведь аналогичное положение имеет место и по другим видам радиоэлектронной аппаратуры и многим изделиям культурно-бытового и хозяйственного назначения.

Качество и в том числе надежность телевизоров, радиоприемников, радиол и других изделий радиоэлектрон-

ной промышленности, несмотря на значительное усложнение их конструкций, за последние годы существенно улучшилось, однако дальнейшее повышение надежности продолжает оставаться важнейшей задачей.

Значение надежности радиоэлектронной аппаратуры растет не только в быту советского человека. Надежность их работы приобретает решающее значение и при использовании их в различных отраслях науки и техники, например, в авиации, медицине и в других областях.

Достижения радиоэлектроники за последние 15—20 лет открыли совершенно новые перспективы и возможности, но эффективность ее использования определяется главным образом эксплуатационной надежностью работы радиоэлектронной техники. Это наглядно видно на следующих примерах.

На первых этапах проникновения радиоэлектроники в авиацию ее приборы и аппаратура играли второстепенную роль; сейчас они все больше занимают ведущую роль и от надежности их работы в значительной степени зависят безопасность полета и все дальнейшие успехи в развитии авиации.

Огромнейшее значение приобретает надежность радиоэлектронной аппаратуры теперь, когда открылась новая эра освоения космоса, после того как в нем побывал советский человек — Юрий Алексеевич Гагарин.

Современные достижения радиоэлектроники открывают безграничные пути ее использования в медицине и биологии. В связи с этим быстро растет количество самых разнообразных электронных приборов, применяемых для хирургии, профилактики, диагностики и лечения различных заболеваний.

Совершенно очевидно, что для медицинских радиоэлектронных приборов, непосредственно связанных со здоровьем и жизнью человека, надежность работы является важнейшим и непременным условием, без которого они не смогут выполнить своего назначения — содействовать улучшению здоровья человека.

С расширением областей применения радиоэлектроники растет сложность аппаратуры, и естественно, что вопросы надежности ее работы приобретают все большее значение.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ — ОСНОВА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

Наша страна вступила в период развернутого строительства коммунистического общества. Марксизм-ленинизм учит, что для построения коммунистического общества важнейшее значение имеет технический прогресс в народном хозяйстве.

Основным средством технического прогресса является широкое применение автоматизации. Если первыми шагами в области автоматизации была автоматизация отдельных производственных операций, то сейчас стоит задача комплексной автоматизации, т. е. создания полностью автоматизированных технологических процессов, цехов и предприятий, создания автоматических систем управления, регулирования и контроля.

Важнейшее место среди всех других средств автоматизации производства занимают радиотехника и электроника.

Одним из примеров применения электронной автоматики является использование электронно-вычислительных машин. Современные электронные машины способны управлять ходом технологических процессов самых разнообразных производств.

Широкое применение в автоматических системах управления и регулирования находит и ряд других радиоэлектронных устройств и приборов.

На наших глазах из сравнительно простого средства передачи информации радиоэлектроника выросла в важнейшее средство управления различными сложными процессами человеческой деятельности.

Без применения радиоэлектроники уже немыслима в настоящее время автоматизация в промышленности, на транспорте и в связи, невозможно создание современных автоматических систем управления, контроля и регулирования.

В Постановлении июньского Пленума ЦК КПСС 1959 г. было указано:

«Учитывая большие возможности электронной техники в деле автоматизации производственных процессов, поручить Госплану СССР, Государственному Комитету

Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению с участием Государственного Комитета Совета Министров СССР по радиоэлектронике разработать и по согласованию с союзными республиками утвердить план внедрения радиоэлектронной техники во все отрасли народного хозяйства».

Но что такое автоматизация? Это прежде всего замена труда человека работой автомата. Роль человека в этом случае сводится к управлению этими автоматами и приборами, к составлению программ для них.

Совершенно естественно, что замена человеческого труда работой автомата может иметь смысл лишь в том случае, если автомат работает быстрее, точнее и экономичнее, а главное надежнее, чем человек. Только при этом условии любые технические средства могут эффективно помочь человеку в управлении сложными производственными процессами.

Выступая на июньском Пленуме ЦК КПСС 1959 г., Президент Академии наук СССР акад. А. Н. Несмеянов говорил:

«Важнейшей задачей, определяющей эффективность применения автоматизации, является проблема обеспечения высокой надежности работы используемых в ней технических средств».

Как видим, надежность и автоматизация тесно связаны. Только при обеспечении высокой надежности всей технической базы автоматизации можно добиться эффективности последней и, наоборот, автоматизация должна гарантировать выпуск изделий более высокой надежности, так как при этом устраняются погрешности, вносимые человеком.

Опыт показывает, что именно надежность работы технических средств начинает все чаще ставить границы созданию совершенных автоматов и автоматических линий.

Трудности, которые приходится испытывать при внедрении автоматических систем управления и регулирования, происходят не только потому, что не всегда хватает соответствующих приборов и аппаратуры, но и потому, что многие из них не обладают необходимой надежностью.

Ненадежность в работе автоматической системы управления, отказ или ошибка в работе такой системы,

даже в случае выхода из строя самой незначительной детали, могут привести к нарушению всего производственного процесса, простоям, громадным экономическим потерям

Надежность играла важную роль и в тот период, когда радиоэлектроника являлась преимущественно средством передачи информации. Ненадежная работа радиоэлектронной аппаратуры могла приводить тогда к искажению передаваемых телеграмм или радиограмм. Но искаженную телеграмму можно было исправить путем ее повторной передачи.

Иное положение сейчас, когда из источника информации радиоэлектроника переросла в важнейшее средство управления.

Ошибочно переданную или исполненную команду управления во многих случаях повторить уже бывает поздно. В ряде отраслей промышленности, особенно таких, как химическая, нефтеперерабатывающая и др., ненадежная работа систем автоматического управления, контроля и регулирования может привести к тяжелым и непоправимым последствиям.

Вряд ли нужно доказывать решающее значение надежности для системы автоблокировки на железнодорожном транспорте, в авиации и других областях.

Глубоко прав поэтому виднейший советский ученый в области радиоэлектроники акад. А. И. Берг, настойчиво и неоднократно подчеркивающий мысль, что при переходе радиоэлектронной аппаратуры из области сбора и передачи информации в сферу управления должен быть сделан качественный скачок в отношении ее надежности.

«Можно без преувеличения сказать, — говорил в одном из своих выступлений А. И. Берг, — что вопрос о надежности сейчас самый важный вопрос из всех вопросов технического прогресса. Без решения этого вопроса не может быть никакой речи об улучшении управления народным хозяйством и сложными динамическими процессами, с которым мы имеем дело в промышленности, на транспорте, в связи, в военной технике и т. д.».

Так, вопрос о надежности радиоэлектронной аппаратуры перерастает в вопрос важнейшего государственного значения.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Мы уже говорили выше, что под **надежностью радиоэлектронной аппаратуры понимается ее способность безотказно выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации и времени.**

Однако это выражение является лишь общим качественным определением надежности. Оно не может быть выражено какой-либо определенной численной величиной.

Между тем для решения проблемы повышения надежности важнейшее значение имеет возможность конкретной, количественной, числовой оценки надежности.

Количественная оценка надежности позволит:

задавать определенные требования по надежности разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуре;

производить расчет надежности в ходе проектирования и производства радиоэлектронной аппаратуры;

сравнивать по надежности различные образцы радиотехнической аппаратуры и систем;

заранее рассчитывать срок службы аппаратуры и т. п.

Количественный показатель надежности является одним из важнейших технических параметров радиоэлектронной аппаратуры наряду с такими параметрами, как мощность, чувствительность, коэффициент усиления и др.

Однако количественная оценка надежности представляет значительно бо́льшие трудности, чем оценка любого другого параметра аппаратуры.

Любой другой технический параметр — мощность, коэффициент усиления и т. п. — зависит в основном от сравнительно небольшого количества элементов аппаратуры. В отличие от этого надежность аппаратуры зависит обычно от надежности почти всех входящих в нее элементов и устройств и от климатических, механических и других условий эксплуатации.

Поэтому вычислять надежность таким же методом, как, скажем, коэффициент усиления, не представляется возможным.

Основным средством исследования вопросов надежности является теория вероятностей, а основным методом — статистический метод.

В своей практике мы сталкиваемся с различными событиями или явлениями, и нас обычно интересуют закономерности, которым они подчиняются.

Происходящие события могут иметь различный характер:

они могут быть достоверными, т. е. такими событиями, которые при проведении данного опыта должны непременно произойти;

они могут быть невозможными, т. е. такими событиями, которые в данном опыте ни при каких условиях не произойдут;

наконец, они могут иметь случайный характер как в самом факте возникновения, так и в их дальнейшем проявлении.

Случайным событием называется такое, которое в результате данного опыта может произойти, но может и не произойти, и нет возможности с полной достоверностью предсказать как его возникновение, так и его исход.

Например, нельзя предсказать с полной достоверностью время, когда та или иная электронная лампа потеряет эмиссию катода или возникнет пробой в конденсаторе и как это отразится на работе всей схемы.

То, что достоверные и невозможные события подчиняются определенным законам, очевидно каждому. Но могут ли подчиняться каким-либо закономерностям случайные события?

При изучении случайных событий было обнаружено, что они также подчиняются определенным закономерностям. Эти закономерности не похожи на обычные законы физических явлений, но все же они существуют. Изучение законов, которым подчиняются случайные события, и является основным содержанием теории вероятностей.

Допустим, имеется случайное событие A, которое при проведении данного опыта или испытания может произойти, а может и не произойти.

При проведении N испытаний событие A произошло K раз.

Отношение $\frac{K}{N}$ называется частотой возникновения события A.

По мере увеличения числа испытаний N отношение $\frac{K}{N}$, т. е. частота возникновения события A, будет стремиться к какой-то постоянной, устойчивой величине.

Основной закон случайных событий и состоит в устойчивости частоты того или иного события при большом количестве проведенных испытаний.

Устойчивая частота определенного случайного события называется вероятностью этого события и обозначается обычно буквой P.

Вероятность всегда выражается положительным числом и может иметь значения от 0 до 1 т. е. $0 \leqslant P \leqslant 1$.

Вероятность достоверного события равна 1.

Вероятность невозможного события равна 0.

Знание вероятности случайного события не может дать однозначного ответа на вопрос, произойдет ли указанное событие при проведении данного опыта или нет.

Вероятность позволяет лишь оценить степень возможности появления интересующего нас события при проведении опыта или испытания.

Применение теории вероятностей дает возможность исследовать взаимосвязь между большим количеством различных причин, влияющих на надежность радиоэлектронной аппаратуры. Статистические методы исследования обеспечивают получение максимума полезных выводов из минимального количества информаций, получаемых при испытаниях и эксплуатации аппаратуры.

Конечно, и статистические методы не дают возможности с абсолютной точностью предсказать надежность проектируемой радиоэлектронной аппаратуры или дать точные сведения о том, сколько времени она будет безотказно работать. Однако они позволяют оценить, какова вероятность надежной, т. е. безотказной, работы аппаратуры в течение интересующего нас времени и какова опасность, что в указанный срок аппаратура может отказать в работе, т. е. выйти из строя.

Понятие «отказ» имеет важнейшее значение для количественной оценки надежности. Большинство отказов радиоэлектронной аппаратуры (как мы увидим далее) имеет случайный характер, и лишь незначительная

часть их обусловливается старением входящих в нее элементов.

«Отказом» называется такая неисправность, без устранения которой невозможно дальнейшее выполнение аппаратурой всех или хотя бы одной из ее основных функций.

Отказ является одним из частных случаев неисправности аппаратуры. Однако не всякая неисправность может быть отнесена к отказам. Существует много таких неисправностей, при наличии которых аппаратура еще может продолжать выполнять свои функции, которые не требуют принятия немедленных мер и могут быть устранены при наступлении первого перерыва в работе или очередном ремонте.

К таким неисправностям, не являющимся отказом, могут быть отнесены перегорание лампочек, освещающих шкалу настройки, или неисправности контрольных измерительных приборов, не участвующих непосредственно в работе аппаратуры, повреждение тех или иных крепежных деталей, нарушение защитных покрытий и т. п.

Однако многие из этих кажущихся второстепенными неисправностей, если их долгое время не устранять и дать им возможность нарастать, рано или поздно могут также привести к отказам.

Отказы могут быть частичными и полными.

При частичном отказе аппаратура перестает выполнять какую-либо одну (или несколько) из своих основных функций, продолжая в то же время работать и выполнять все остальные функции. Например, в телевизоре пропадает звуковое сопровождение, в то время как само изображение продолжает передаваться нормально.

При полном отказе аппаратура перестает выполнять все свои функции. В телевизоре это означает, что нет ни изображения, ни звука.

В процессе эксплуатации аппаратуры в ней время от времени возникают частичные или полные отказы. Каждый раз после устранения отказа аппаратура продолжает нормально работать, пока не наступит следующий отказ. Так как за время службы аппаратуры

случайные отказы в ней наступают неоднократно, то при большом числе их можно установить какую-то устойчивую, среднюю частоту отказов λ (лямбда). Этот параметр показывает, какая в среднем часть используемых изделий выходит из строя за определенный интервал времени, например за час работы.

Практически чаще употребляют обратную величину, т. е. период появления отказов $T = \frac{1}{\lambda}$.

Эти два параметра являются исходными в теории надежности.

Величину, позволяющую количественно оценить (сравнить) надежность работы данного образца аппаратуры или элемента, обычно называют наработкой аппаратуры на один отказ и выражают в часах.

Наработка на один отказ показывает время нормальной работы аппаратуры между двумя смежными отказами.

Чтобы определить среднюю наработку на один отказ того или иного конкретного экземпляра аппаратуры, обычно испытывают его в течение времени $t_с$, по крайней мере в 10 раз большего, чем число часов наработки на один отказ (если наработка на один отказ составляет 100 *ч*, испытания производят в течение не менее 1 000 *ч*, восстанавливая работоспособность образца после каждого отказа).

Для определения средней наработки на отказ того или иного типа аппаратуры с точностью ±10% испытаниям подвергают не менее 10 образцов данного типа.

Средняя наработка на отказ выражается формулой

$$T_{ср} = \frac{t_с}{n},$$

где $t_с$ — срок службы аппаратуры (или время испытаний), *ч*;

n — количество отказов, происшедших за этот срок (за время испытаний).

Для различных типов радиоэлектронной аппаратуры, в зависимости от ее сложности, условий эксплуатации, средняя наработка на отказ может лежать в очень широких пределах от единиц до сотен часов.

Наименьшую величину средней наработки на один отказ имеет обычно аппаратура, эксплуатация которой происходит в более трудных условиях, например, самолетная радиоэлектронная аппаратура.

Наибольшую величину средней наработки на один отказ обычно имеет стационарная аппаратура, работающая в более спокойных условиях и при постоянных температуре и влажности.

Понятие средней наработки на отказ очень удобно для сравнения и оценки надежности различных экземпляров одного и того же типа аппаратуры, работающей в одинаковых условиях.

По-другому обстоит вопрос, если необходимо сравнить надежность аппаратуры различного типа, имеющей разное назначение и используемой в разных условиях эксплуатации. Здесь средняя наработка на отказ уже не может служить достаточным мерилом для оценки и сравнения надежности аппаратуры.

Предположим, например, что имеются бортовая радиостанция на вертолете, средняя наработка которой на отказ равна 25 *ч*, и радиостанция на пассажирском самолете дальнего действия, средняя наработка которой составляет 50 *ч*.

Если судить только по средней наработке на отказ, самолетная радиостанция является более надежной и с большей безотказностью выполняет свое назначение, чем радиостанция на вертолете.

Однако этот вывод не учитывает одного очень важного требования — времени, в течение которого аппаратура по характеру своего назначения и использования должна работать непрерывно.

Для того чтобы сравнить вероятность безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры различных типов, в оценку их надежности, кроме средней наработки на отказ, вводят время, в течение которого данный тип аппаратуры должен непрерывно выполнять свои функции.

Показатель времени является главнейшим фактором, на котором базируются надежность, долговечность и точность работы систем, приборов и элементов.

Критерий оценки надежности, учитывающий как среднюю наработку на отказ, так и необходимое время исправной работы аппаратуры данного типа, называют

вероятностью безотказной работы за определенный интервал времени и выражают уравнением

$$P_0 = e^{-\frac{t_р}{T_{ср}}},$$

где P_0 — вероятность безотказной работы;
e — основание натуральных логарифмов;
$t_р$ — интервал времени (в часах), в течение которого аппаратура данного типа должна исправно выполнять свои функции;
$T_{ср}$ — средняя наработка на отказ (в часах) для аппаратуры данного типа.

Это уравнение часто называют экспоненциальным законом надежности (закон или распределение Пуассона). Это означает, что вероятность исправной работы аппаратуры с течением времени убывает по логарифмической кривой.

Выше мы привели пример с бортовыми радиостанциями вертолета и пассажирского самолета дальнего действия. Хотя средняя наработка на отказ радиостанции вертолета вдвое меньше самолетной, однако, учитывая, что необходимое время непрерывной работы радиостанции вертолета в несколько раз меньше, чем станции дальнего самолета, вероятность безотказной работы за требуемый интервал времени у радиостанции вертолета будет выше.

Может казаться, что если необходимый интервал времени непрерывной работы равен времени средней наработки на отказ, то вероятность безотказной работы аппаратуры за этот интервал времени должна быть равна 100%.

Однако это далеко не так.

Из уравнения экспоненциального закона видно, что при $t_р = T_{ср}$ вероятность безотказной работы аппаратуры будет равна $P = \frac{1}{e} = 0{,}37$, т. е. составит лишь 37%.

Это означает, что из 100 экз. аппаратуры данного типа в течение времени, равного средней наработке на один отказ, безотказно проработают в среднем только 37 экз., или иначе, что один и тот же экземпляр проработает безотказно в течение указанного времени только в 37 случаях из 100.

Подсчеты показывают, что для обеспечения вероятности безотказной работы порядка 0,9, т. е. в 90 случаях из 100, необходимо, чтобы средняя наработка на отказ данного типа аппаратуры была по крайней мере в 10 раз больше, чем необходимый интервал непрерывной работы этой аппаратуры.

Зависимость надежности аппаратуры от соотношения необходимого времени ее непрерывной работы и средней наработки на отказ, т. е. от соотношения $\frac{t_р}{T_{ср}}$, видна из рис. 1.

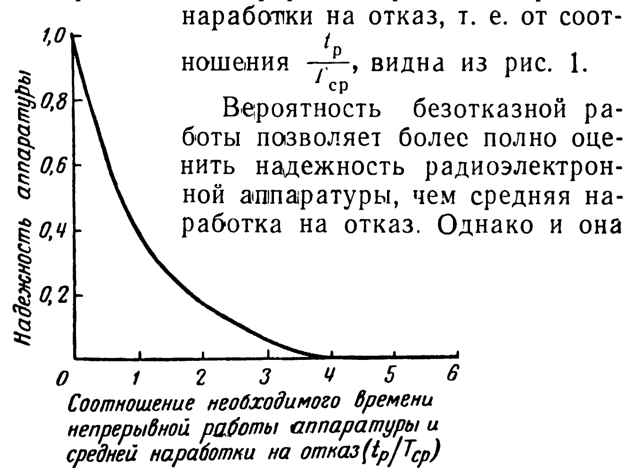


Рис. 1. Экспоненциальный закон надежности.

Вероятность безотказной работы позволяет более полно оценить надежность радиоэлектронной аппаратуры, чем средняя наработка на отказ. Однако и она не дает исчерпывающей характеристики аппаратуры, так как не учитывает еще одного весьма важного показателя, а именно времени, которое приходится затрачивать на ремонт аппаратуры в процессе ее эксплуатации.

Поясним значение этого показателя на конкретном примере.

В любой аппаратуре, как бы надежна она ни была, периодически происходят отказы, требующие быстрого устранения. Кроме того, аппаратура нуждается в плановом ремонте.

Допустим, что мы имеем два образца аппаратуры. Первый образец имеет более высокую среднюю наработку на отказ, допустим 200 *ч*, т. е. время его исправной работы между двумя отказами равно 200 *ч*.

Второй образец имеет вдвое более низкую наработку на отказ, всего 100 *ч*.

Казалось бы, что первый образец заслуживает явного предпочтения. Однако в процессе эксплуатации обоих образцов выявилось, что:

в первом образце в результате его неудачной конструкции, тесноты монтажа, плохого доступа к деталям для осмотра их и замены на устранение причин каждого отказа затрачивалось в среднем 20 *ч*;

во втором образце, имеющем конструкцию, обеспечивающую более легкий доступ к любой детали, на устранение каждого отказа требовалось в среднем всего 5 *ч*.

Какой же из образцов удобнее в эксплуатации? Все зависит от конкретного назначения и условий использования образца. В ряде случаев может оказаться выгоднее допустить более частые отказы аппаратуры, если устранение их требует минимального времени, чем иметь более редкие отказы, устранение которых требует большого времени и связано с длительными простоями аппаратуры.

Для оценки аппаратуры с этой точки зрения вводится понятие ее ремонтопригодности. Под ремонтопригодностью понимается приспособленность аппаратуры к быстрому восстановлению ее работоспособности после появления отказа.

Количественная оценка ремонтопригодности производится по формуле

$$K_р = \frac{t_{пр}}{t_р},$$

где $t_{пр}$ — время простоя аппаратуры, необходимое для восстановления ее работоспособности после появления отказов и для планового ремонта;

$t_р$ — время нормальной работы аппаратуры.

Очевидно, что чем меньше величина коэффициента $K_р$, тем лучше ремонтопригодность аппаратуры.

Для рассмотренных нами выше двух образцов ремонтопригодность будет:

у первого образца

$$K_{р1} = \frac{20}{200} = 0,1;$$

у второго образца

$$K_{р2} = \frac{5}{100} = 0,05.$$

Как видим, второй образец обладает лучшей ремонтопригодностью, чем первый.

До сих пор мы говорили о критериях надежности радиоэлектронной аппаратуры или, как иногда говорят, радиоэлектронных систем, состоящих из большого количества различных элементов.

Рассмотрим теперь основные показатели надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Элементом принято называть конструктивно отдельную часть аппаратуры, не имеющую самостоятельного эксплуатационного значения. При анализе надежности радиоэлектронной аппаратуры элементами обычно считают типовые радиодетали и изделия: конденсаторы, сопротивления, электронные лампы, полупроводниковые приборы, монтажные провода, предохранители и т. п.

В любой аппаратуре за время ее службы полные или частичные отказы происходят неоднократно. Каждый раз после устранения отказа аппаратура восстанавливает работоспособность и продолжает выполнять свое назначение.

Поэтому для аппаратуры понятия надежность и долговечность не являются тождественными.

Если надежность аппаратуры определяется средним сроком ее исправной работы от одного отказа до другого, то долговечность аппаратуры определяется общим сроком ее службы от начала эксплуатации до признания ее полностью негодной.

Таким образом, время работы аппаратуры между двумя соседними отказами является лишь незначительной частью ее общего срока службы.

Мы уже говорили, что практически среднее время исправной работы различных видов радиоэлектронной аппаратуры между двумя соседними отказами лежит в пределах от нескольких часов до сотен часов, в то время как общий срок службы той же аппаратуры может составлять многие тысячи часов.

Другое дело элементы. Как правило, при отказе того или иного элемента радиоэлектронной аппаратуры (потеря эмиссии лампой, перегорание предохранителя, пробой конденсатора и т. п.) работоспособность его уже не может быть восстановлена и он подлежит замене. Иными словами, срок службы большинства элементов со-

впадает со временем их работы до первого отказа, который является для них и последним отказом.

Поэтому такой показатель, как частота отказов или средняя наработка на отказ, очень важный для оценки надежности аппаратуры или системы, непригоден для оценки надежности элементов.

Неприменим для элементов, естественно, и такой важный для аппаратуры показатель, как ремонтопригодность.

Общим и для аппаратуры и для элементов является лишь один показатель — вероятность безотказной работы за определенный интервал времени.

Обычно начало интервала времени работы элемента считают с момента его первого включения на работу.

Интервал времени, для которого рассчитывается безотказная работа элемента, иногда называют гарантийным сроком службы элемента.

Вероятность безотказной работы элемента за гарантийный срок службы определяется по уже знакомой нам формуле

$$P = e^{-\frac{t_г}{T_{ср}}},$$

где $t_г$ — гарантийный срок службы элемента;

$T_{ср}$ — средний срок службы элемента.

Какова же взаимосвязь между вероятностью безотказной работы аппаратуры в целом и вероятностью безотказной работы за тот же интервал времени составляющих ее элементов или, иными словами, какова зависимость общей надежности аппаратуры от надежности всех входящих в нее элементов?

Это определяется прежде всего характером соединения элементов, о чем далее будет сказано подробнее.

В общем случае согласно теории вероятностей надежность аппаратуры равна произведению надежности всех входящих в нее элементов.

Поясним это на конкретном примере. Предположим для простоты, что какой-либо образец аппаратуры состоит из 100 последовательно соединенных элементов, надежность которых равнозначна и равна 0,99.

Казалось бы, что поскольку в аппаратуре нет ни одного элемента с надежностью менее 0,99, общая надежность аппаратуры будет также не менее 0,99.

На самом деле общая надежность аппаратуры будет значительно ниже. Поскольку, как сказано выше, надежность аппаратуры равна произведению надежностей всех входящих в нее элементов, для данного случая она будет равна 0,37.

Этот пример показывает, что надежность радиоэлектронной аппаратуры и устройств зависит не только от качества входящих в них элементов, но и от их количества.

С ростом числа элементов при неизменной величине их надежности общая надежность аппаратуры резко уменьшается.

Зависимость общей надежности аппаратуры от надежности составляющих ее элементов и их количества показана на рис. 2. На нем по оси абсцисс откладывается количество используемых в аппаратуре элементов (при их последовательном включении); кривые соответствуют различной надежности используемых элементов, а ось ординат показывает общую надежность аппаратуры при заданном количестве используемых элементов и их надежности.

Для того чтобы найти общую надежность аппаратуры, нужно отложить по оси абсцисс количество используемых в ней элементов, восстановить из полученной точки перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей надежности используемых элементов, и из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось ординат.

Полученная на оси ординат точка покажет общую надежность аппаратуры.

Пользуясь рис. 2, мы можем, например, определить, что при надежности одного элемента, равной 0,99, общая надежность равна:

для аппаратуры из 10 элементов — 0,91;
для аппаратуры из 40 элементов — 0,66;
для аппаратуры из 80 элементов — 0,48.

Чем сложнее становится радиоэлектронная аппаратура, чем большее количество элементов в нее входит, тем выше должна быть вероятность безотказной рабо-

ты каждого из них, чтобы общая вероятность безотказной работы аппаратуры сохранилась на прежнем уровне.

Иллюстрацией этого положения могут служить цифры, приведенные в 1959 г. на ежегодном симпозиуме (конференции) по надежности и контролю качества, происходившем в США.

В качестве примера был приведен межконтинентальный баллистический снаряд «Атлас». Он содержит 300 000 отдельных деталей.

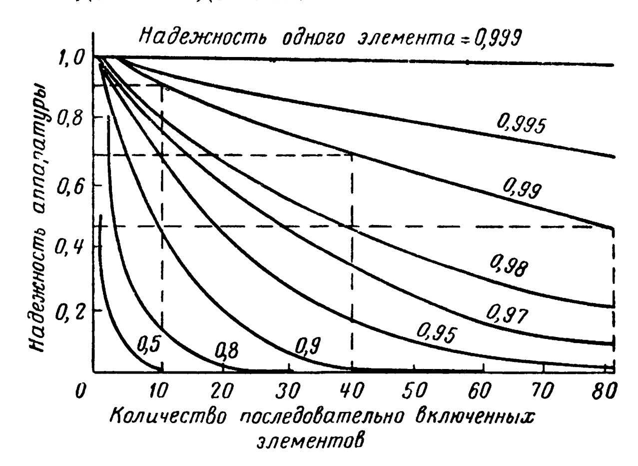


Рис. 2. Надежность аппаратуры из *n* последовательных равнонадежных элементов.

Для того чтобы обеспечить надежность этого снаряда 90%, а это для него не очень высокая надежность, необходимо, чтобы каждая из 300 000 входящих в него деталей имела надежность, равную 99,99996%, т. е. практически работала безотказно.

Кроме вероятности безотказной работы, надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры часто характеризуется различными усредненными статистическими показателями.

Наиболее распространенным статистическим показателем надежности элементов является **средний процент отказов элементов данного типа, отнесенный к определенному времени их работы** (например, 1 000 *ч*) **и к общему числу элементов данного типа в аппаратуре.**

Средний процент отказов определяется по формуле

$$K_t = \frac{d}{St} \cdot 100\%,$$

где d — суммарное число элементов рассматриваемого типа, отказавших за время t;

t — время, обычно выражаемое в тысячах (иногда в сотнях) часов;

S — суммарное число элементов данного типа, установленных в аппаратуре.

Иногда этот коэффициент называют статистическим параметром надежности элементов.

На практике применяется и ряд других показателей надежности аппаратуры и элементов, но они имеют более частный характер, и поэтому мы на них не останавливаемся.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРИЧИНЫ НЕНАДЕЖНОСТИ

Итак, надежность радиэлектронной аппаратуры определяется прежде всего тем, насколько часто в ней происходят полные или частичные отказы и насколько она приспособлена к их быстрому устранению.

Отказы бывают внезапные и постепенные (износовые) или, как их классифицирует акад Н. Г. Бруевич, грубые и негрубые. Чем отличаются друг от друга эти виды отказов, каковы их причины и характерные черты?

Основное свойство внезапных отказов — случайный характер их появления.

Физический смысл внезапного отказа сводится к тому, что после некоторого, обычно сравнительно быстрого количественного изменения какого-либо парамегра элемента схемы в нем происходит качественный скачок, в результате которого он теряет свои важнейшие свойства, необходимые для обеспечения стабильной работы аппаратуры. К таким отказам можно отнести перегорания предохранителя, пробой изоляции, короткое замыкание в лампе и др.

Причинами внезапных отказов чаще всего являются скрытые производственные дефекты и некачественные материалы и комплектующие детали.

Внезапные отказы могут вызываться также резкими изменениями внешних условий, например ударами, сильной вибрацией, перегревом и т. п.

Внезапные отказы в большинстве случаев являются полными и очевидными. Появление в аппаратуре дыма и запаха гари, исчезновение звука в приемнике или изображения в телевизоре, нарушение настройки передатчика и т. п. наглядно свидетельствуют об отказе и его характере.

Однако если наличие внезапного отказа легко обнаружить, то установить его причины бывает значительно труднее. Иногда приходится долго отыскивать истинную причину отказа, прежде чем удастся обнаружить, какой из элементов вышел из строя и требует замены.

Опыт показывает, что внезапные или грубые отказы чаще всего возникают в начальный период эксплуатации аппаратуры.

В отличие от внезапных отказов постепенные (негрубые) отказы зависят главным образом от длительности эксплуатации аппаратуры, т. е. от срока ее службы.

Физический смысл постепенного отказа сводится к тому, что в результате постепенного, сравнительно медленного количественного изменения того или иного параметра элемента схемы этот параметр выходит за допустимые пределы, предусмотренные техническими условиями. В результате аппаратура в целом перестает нормально выполнять все или часть своих основных функций.

К постепенным отказам можно отнести понижение эмиссии электронной лампы, изменение емкости конденсаторов, величины сопротивлений и пр.

Постепенные отказы являются закономерным и неизбежным результатом износа и старения комплектующих деталей и материалов.

Благодаря этому постепенные отказы можно предупредить, периодически проверяя аппаратуру и своевременно заменяя детали, близкие к отказу.

Если внезапный отказ является, как правило, полным и очевидным, то постепенный отказ бывает обычно частичным и скрытым. Явные признаки отказа в большинстве случаев отсутствуют, и поэтому сами отказы часто обнаруживаются с запозданием, лишь в про-

цессе очередного осмотра и ремонта аппаратуры. Обнаружение постепенного отказа в процессе эксплуатации часто бывает затруднено из-за применения в схемах аппаратуры различных автоматических систем регулирования.

Если графически изобразить частоту отказов, то для каждого типа аппаратуры она будет выглядеть по-разному. Однако можно построить некоторую общую кривую частоты отказов, характерную для большинства

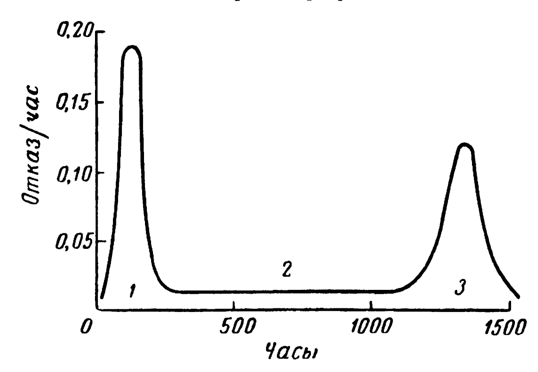


Рис. 3. Типовая кривая частоты отказов сложной радиоэлектронной аппаратуры.

типов радиоэлектронной аппаратуры. Эта типовая кривая показана на рис. 3.

Кривая частоты отказов имеет три явно выраженных, характерных участка, обозначенных цифрами *1*, *2*, и *3*.

Первый участок соответствует некоторому начальному периоду работы аппаратуры. Период этот для различных видов аппаратуры может продолжаться от нескольких десятков до сотен часов. Он характеризуется повышенной частотой отказов, бо́льшую часть которых составляют внезапные отказы.

В этот начальный период наибольшее число отказов приходится на электровакуумные приборы.

Конденсаторы и сопротивления, обладающие большим сроком службы, не дают заметного повышения частоты отказов. Отказы, являющиеся следствием нарушения технологического процесса и низкой культуры производства, как правило, больше всего выявляются в этот первоначальный период эксплуатации.

После замены отказавших деталей частота отказов постепенно уменьшается. Начальный период называют периодом «приработки» аппаратуры. Обычно первый участок вырабатывается во время заводской наладки и настройки или тренировки аппаратуры и не входит в период ее плановой эксплуатационной работы.

Основным и наиболее длительным по времени является второй участок кривой. Отказы и в этот период имеют в основном внезапный характер, но средняя частота их резко снижается и становится сравнительно постоянной. На основе анализа именно этого периода работы аппаратуры и были определены все рассмотренные в предыдущей главе количественные показатели надежности. Для этого периода, когда износ деталей практически еще не наступил, а период «приработки» закончился, справедлив экспоненциальный закон надежности (закон распределения Пуассона).

После сравнительно продолжительного периода устойчивой работы, составляющего обычно для многих видов аппаратуры несколько тысяч часов, наступает период, показанный на третьем участке кривой. Он характеризуется новым нарастанием частоты отказов, имеющих на этот раз преимущественно постепенный характер и являющихся результатом старения и износа элементов и материалов, примененных в аппаратуре.

Часто радиоэлектронная аппаратура не успевает доработать до этого периода. Если же аппаратура продолжает работать и дальше, то для восстановления ее надежности производятся полная проверка всех деталей и замена тех из них, которые вышли из строя или потеряли свои первоначальные параметры, т. е. капитальный ремонт аппаратуры.

Из сказанного очевидно, что надежность работы радиоэлектронной аппаратуры в решающей степени зависит от надежности всех входящих в нее отдельных элементов, деталей и материалов.

Выход из строя хотя бы одного элемента, находящегося под током или напряжением, приводит, как правило, к отказу всей аппаратуры или к ухудшению ее параметров.

Какие же детали или элементы чаще являются причиной отказа аппаратуры?

В общем случае все элементы, из которых обычно состоит радиоэлектронная аппаратура, можно разделить на два основных вида: элементы электрической схемы (электроэлементы) и механические элементы.

Электроэлементами принято называть детали и изделия, имеющие самостоятельное обозначение на принципиальных и монтажных электрических схемах и входящие в электрические цепи. К электроэлементам относятся типовые и специальные детали и изделия: электровакуумные и полупроводниковые приборы, сопротивления, конденсаторы, предохранители, изоляторы и т п.

В группу механических элементов входят все элементы кинематической схемы: подшипники, разъемы, зубчатые колеса, переключатели, контакты, крепежные детали и т. п.

Решающую роль в работе радиоэлектронной аппаратуры играют элементы электрической схемы. Они значительно сложнее и многочисленнее, чем механические элементы, и поэтому они обычно являются главным источником отказов аппаратуры.

Внезапные отказы (поломки) механических деталей встречаются сравнительно редко, а постепенные (износовые) отказы их появляются обычно позже, чем у электроэлементов. Они наблюдаются обычно в радиоэлектронной аппаратуре, эксплуатируемой не в стационарных условиях.

Относительное количество элементов в радиоэлектронной аппаратуре различно и зависит от ее назначения и сложности.

От назначения и сложности аппаратуры зависит и удельный вес основных типов элементов.

В табл. 1 приведено примерное распределение элементов для различных видов аппаратуры.

Наименее надежными элементами радиоэлекгронной аппаратуры являются электровакуумные изделия. Поэтому, хотя они и составляют обычно не более 10% всего количества элементов аппаратуры, число отказов по их вине часто превышает 50% всех отказов аппаратуры.

Причины, вызывающие быстрый выход из строя электровакуумных приборов, можно разделить на две группы:

Таблица 1

Распределение типовых элементов в радиоэлектронной аппаратуре

Элементы	Процент элементов принципиальной схемы		
	Радиолокационная и радионавигационная аппаратура	Приемно-передающая радиоаппаратура	Приемная радиоаппаратура
Электровакуумные приборы	5,3—11,6	3,5—6	3,6—7,3
Полупроводниковые приборы	0—14	0—4	0—2
Конденсаторы	20—32	37—52	41—61
Сопротивления	37—51	22—31	16—28
Трансформаторы и дроссели	3,2—14	4,2—12	0—7,1
Катушки индуктивности, фильтры, линии задержки	1,2—14	3,6—10	8—22
Реле	0—2,5	0—4,8	0—3,3
Сельсины, электродвигатели, преобразователи	0—2,7	0—1,6	0—0,5
Измерительные приборы	0—2,3	0—1,4	0—0,6
Осветительные и индикаторные лампы	0—4	0—1,1	0—0,5
Селеновые и купроксные выпрямители	0—2,7	0—0,8	0—1,2
Кварцы	0—0,4	0—7	0—2,8
Предохранители	0,2—4,8	0,3—0,9	0,3—0,6

причины, ведущие к внезапному выходу из строя электронных ламп и проявляющиеся обычно в начальный период их эксплуатации;

причины, ускоряющие потерю эмиссии и изменение параметров ламп.

В число причин первой группы входят короткое замыкание между электродами, обрывы электродов, трещины у ножек и баллонов и т. п. Эти дефекты являются следствием нарушения технологического процесса или низкого качества стекла и других материалов.

Нарушение технологии, вакуумной гигиены, отклонения в качестве исходных материалов приводят, как правило, к непоправимым последствиям, так как внутренние дефекты готовых ламп уже нельзя устранить, а скрытые дефекты в процессе предварительных испытаний почти невозможно обнаружить.

К причинам второй группы относятся повышение или понижение напряжения накала, наличие вибрации и т. п.

Таблица 2

Причины выхода из строя приемно-усилительных ламп

Дефекты	Выход из строя, %
Обрывы и перегорания нити накала	20—28
Замыкания между электродами	17—20
Изменения параметров и потеря эмиссии	43—51
Трещины в балонах, поломка цоколя и ножек и пр.	9—12

Процентное соотношение причин выхода из строя приемо-усилительных ламп видно из табл. 2.

Основной причиной выхода из строя конденсаторов являются пробой диэлектрика и перекрытие между обкладками через закраины (70—75% всех отказов).

Эти причины отказов наиболее часто наблюдаются у бумажных и слюдяных и иногда у керамических конденсаторов (перекрытие через зазор).

Причиной пробоев являются обычно слабые места в диэлектрике, не замеченные в процессе изготовления и испытания конденсаторов.

Перекрытие между обкладками является результатом дефектов в технологии производства (повреждение слюдяных пластинок, нарушение величины закраин и т. п.).

Важнейшими причинами выхода из строя сопротивлений являются обрывы и нарушения контактов (55—60% всех отказов) и перегорание сопротивлений (35—40%). Заметную роль играют также изменения величины сопротивления (5—8%).

Обрывы и нарушения контактов характерны для проволочных постоянных и переменных сопротивлений всех типов. Нарушения контактов выводов наблюдаются у непроволочных сопротивлений типов ВС и МЛТ.

Перегорание обычно наблюдается у переменных сопротивлений СП, постоянных проволочных сопротивлений и потенциометров. Более половины сгоревших сопротивлений выходит из строя из-за больших перегрузок, вызванных замыканием электродов электронных ламп и пробоем конденсаторов.

Наиболее частыми причинами выхода из строя трансформаторов, дросселей и других моточных изде-

лий являются нарушения электрической прочности межвитковой изоляции и изоляции на корпус, обрывы и перегорание проводов, плохая влагозащищенность, тяжелый тепловой режим (отсутствие отвода тепла). Нередко причиной выхода из строя трансформаторов бывают замыкания электродов в электронных лампах и пробой конденсаторов.

Применяемые в радиоэлектронной аппаратуре различного рода реле могут выходить из строя из-за залипания и обгорания контактов, поломки пружинных пластин, обрывов обмоток.

Повышение надежности работы элементов, используемых в радиоэлектронной аппаратуре, связано главным образом с уровнем культуры производства предприятий, их изготовляющих, и жестким контролем за качеством применяемых исходных материалов.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗАКЛАДЫВАЕТСЯ ПРИ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Изделия радиоэлектроники, как и любые другие технические средства, проходят последовательные этапы проектирования, производства и эксплуатации.

Все три этапа в той или иной степени влияют на надежность и долговечность работы радиоэлектронной аппаратуры. Однако значение каждого из указанных этапов для надежности неравнозначно.

Период эксплуатации — самый важный и обычно самый длительный период существования аппаратуры Но возможности для повышения надежности аппаратуры в этот период наиболее ограничены.

В эксплуатацию поступает уже законченная производством, готовая аппаратура. Без изменения ее схемы, конструкции, используемых в ней деталей и элементов добиться сколько-нибудь заметного повышения ее надежности невозможно.

Поэтому обычно задачей эксплуатации являются поддержание возможно более длительное время уровня надежности аппаратуры, достигнутого в процессе ее проектирования и производства, а также сбор и обоб-

щение данных о конструктивных, схемных и производственных недостатках аппаратуры для учета их при разработке последующих образцов.

Решающими этапами в обеспечении высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры являются этапы ее проектирования и производства.

Опыт показывает, что если в ходе проектирования нового образца радиоэлектронной аппаратуры вопросам ее надежности не уделено должного внимания, необходимый уровень ее надежности не обеспечивается, то повышение надежности такого образца в ходе его производства, или, как говорят, «доводка» образца, обходится значительно дороже и требует больших усилий и времени.

На практике это требование не всегда соблюдается. Недоработки схемы первых партий некоторых наших телевизоров приходилось устранять уже в процессе их эксплуатации. Таких примеров, к сожалению, можно привести много.

Следовательно, чтобы обеспечить высокую надежность любого нового образца радиоэлектронной аппаратуры, крайне важно, чтобы требуемый уровень надежности был обеспечен еще в период проектирования образца.

Однако этого еще недостаточно. Если надежность образца, заложенная при его проектировании, не будет обеспечена соответствующим технологическим процессом и контролем при его серийном производстве, поступающая в эксплуатацию аппаратура будет иметь пониженные показатели надежности.

Поэтому для обеспечения высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры необходимо, чтобы она:

закладывалась при проектировании аппаратуры;

обеспечивалась при ее производстве;

поддерживалась при ее эксплуатации.

Какие же мероприятия следует осуществлять на этапе проектирования аппаратуры для обеспечения ее высокой надежности?

Под этапом проектирования понимается обычно период времени от формулирования тактико-технических требований (ТТТ) или технического задания (ТЗ) на разрабатываемую аппаратуру до передачи технической документации (чертежи, технические условия, описа-

ния и т. п.) на завод, который будет изготовлять данную аппаратуру серийно.

Отработка вопросов надежности должна производиться на всех четырех стадиях, из которых состоит проектирование:

подготовительной стадии (в процессе которой производятся оценка условий эксплуатации проектируемой аппаратуры, расчет требуемой надежности составляющих элементов, выбор соответствующих типов элементов и режимов их использования и т. п.);

стадии проектирования;

стадии изготовления образца;

стадии экспериментальной проверки образца.

С самого начала проектирования аппаратуры необходимо учитывать все факторы, определяющие ее надежность. Важнейшими из них являются качество и количество элементов, намечаемых к использованию, режимы их работы, схемное и конструктивное построение аппаратуры

Мы уже говорили в гл. 4, что для обеспечения требуемой надежности любого образца радиоэлектронной аппаратуры необходимо, чтобы в технические условия на его разработку включались конкретные требования его надежности.

Эти требования кладут в основу при выборе схемных элементов проектируемого образца и расчете их надежности. Для использования отбираются наиболее современные и качественные детали, обладающие наибольшей стабильностью параметров и эксплуатационной надежностью.

Разработчик радиоэлектронной аппаратуры должен хорошо знать не только всю номенклатуру серийно выпускаемых деталей и элементов и их характеристики, но и образцы новых разрабатываемых деталей, чтобы ориентироваться на наиболее совершенные, перспективные детали.

В числе серийно выпускаемых деталей нередко имеется ряд устаревших типов, подлежащих снятию с производства В 1959 г. по заданию Государственного Комитета Совета Министров СССР по радиоэлектронике специальными комиссиями были рассмотрены нормали и технические условия на все основные типы существующих деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Комиссии рекомендовали запретить к употреблению в разрабатываемой аппаратуре значительное количество выпускаемых деталей.

Так, из рассмотренных 183 нормалей и технических условий (ТУ) на конденсаторы комиссия сочла возможным рекомендовать к использованию только 88 (48%).

Из рассмотренных 89 нормалей и ТУ на сопротивления комиссия рекомендовала использовать только 42 (или 47%).

Перечни рекомендуемых образцов составлены и по электровакуумным изделиям и полупроводниковым приборам

Широкое применение полупроводниковых приборов в проектируемых образцах радиоэлектронной аппаратуры весьма целесообразно, так как они принципиально более надежны, чем электронные лампы, и требуют значительно меньших напряжений питания, что облегчает режимы работы и других деталей.

При выборе необходимых деталей в ходе проектирования следует помнить, что разброс их параметров в конце срока службы обычно в несколько раз превышает разброс параметров в начале эксплуатации.

Весьма целесообразно использовать в аппаратуре элементы и детали с примерно одинаковым сроком службы. Это позволит снизить общую частоту отказов аппаратуры и повысить надежность ее работы.

Надежность работы большинства элементов радиоэлектронной аппаратуры зависит не только от качества их изготовления, но главным образом и от режима их использования.

Даже самые высококачественные элементы и детали, поставленные в тяжелый, не предусмотренный для них режим работы, могут быстро выйти из строя.

Поэтому важнейшей задачей при проектировании радиоэлектронной аппаратуры является обеспечение таких условий, чтобы все используемые в образце элементы и детали работали только в режимах, предусмотренных техническими условиями на них.

Режим работы элементов определяется коэффициентом нагрузки, выражаемым в общем виде формулой

$$K_{н} = \frac{H_{р}}{H_{н}},$$

где $K_н$ — коэффициент нагрузки;

$H_р$ — нагрузка элемента в рабочем режиме;

$H_н$ — номинальная (предусмотренная ТУ) нагрузка элемента.

Для электронных ламп коэффициент нагрузки выражается формулой

$$K_н = \frac{P_а + P_н + P_с}{P_{а.макс} + P_{ном}},$$

где $P_а$ — мощность, рассеиваемая на аноде;

$P_н$ — мощность, рассеиваемая в цепи накала,

$P_с$ — мощность, рассеиваемая на сетке;

$P_{а.макс}$ — максимально допустимая мощность анода;

$P_{ном}$ — номинальная мощность накала.

Коэффициент нагрузки для прозолочных и углеродистых сопротивлений определяется как

$$K_н = \frac{P_р}{P_0},$$

где $P_р$ — рассеиваемая мощность;

P_0 — номинальная мощность.

Для конденсаторов коэффициент нагрузки выражается формулой

$$K_н = \frac{U_р}{U_0},$$

где $U_р$ — напряжение, приложенное к конденсатору;

U_0 — номинальное напряжение.

Использование элементов в перегруженном режиме, т. е. при $K_н > 1$, разко сокращает срок их службы.

Наоборот, использование в разгруженном режиме, т. е. при $K_н < 1$, уменьшает среднюю частоту отказов аппаратуры и значительно увеличивает продолжительность ее нормальной работы.

Работа аппаратуры при номинальном и разгруженном режимах использования ее элементов показана на рис. 4.

Кривая *1* (сплошная линия) показывает работу аппаратуры при номинальном режиме используемых в ней элементов, а участки кривой I_1, II_1 и III_1 — соответствующие периоды работы этой аппаратуры: участок I_1 —

«приработка» аппаратуры, участок II_1 — период устойчивой работы аппаратуры и участок III_1 — начало старения и износа используемых в аппаратуре элементов (подробнее об этих участках см. стр. 29 и рис. 3).

Кривая *2* (пунктирная линия) и ее участки I_2, II_2 и III_2 иллюстрируют соответственно работу аппаратуры при разгруженном режиме используемых в ней элементов.

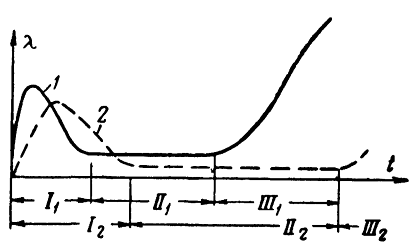


Рис. 4. Изменения частоты отказов во времени при номинальном и разгруженном режимах.

1 — при номинальном режиме; *2* — при разгруженном режиме.

Сравнение кривых *1* и *2* показывает, что хотя при разгруженном режиме использования элементов первый, начальный, период работы аппаратуры (период «приработки») несколько удлиняется (так как производственные дефекты элементов проявляются медленнее), зато третий период, связанный со старением и износом элементов, наступает значительно позже. В результате второй, основной, период устойчивой работы аппаратуры при разгруженном режиме использования элементов II_2 становится значительно продолжительнее (ср. с II_1).

Исходя из указанных выше соображений, в большинстве современных образцов радиоэлектронной аппаратуры основные элементы используют в разгруженном режиме.

На рис. 5 и 6 показано распределение деталей по коэффициенту нагрузки $К_н$ для одного из типичных видов радиоэлектронной аппаратуры: конденсаторов и сопротивлений, а также электронных ламп.

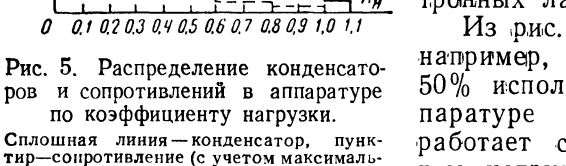


Рис. 5. Распределение конденсаторов и сопротивлений в аппаратуре по коэффициенту нагрузки.

Сплошная линия — конденсатор, пунктир — сопротивление (с учетом максимальной рабочей температуры в блоках).

Из рис. 5 и 6 видно, например, что: свыше 50% используемых в аппаратуре сопротивлений работает с коэффициентом нагрузки менее 0,1;

с коэффициентом нагрузки выше 0,5 работает менее 5% всех используемых сопротивлений; основная часть используемых в аппаратуре конденсаторов также имеет коэффициент нагрузки менее 0,1; в режиме, превышающем допустимую нагрузку, т. е. с коэффициентом больше 1, работает лишь около 2% используемых конденсаторов; основная часть применяемых в аппаратуре ламп используется в режиме, соответствующем коэффициенту нагрузки 0,5—0,6.

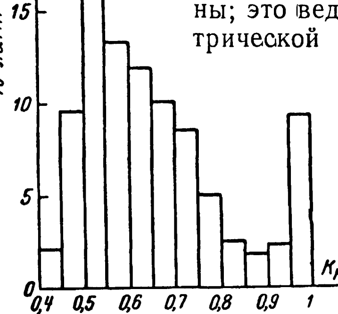


Рис. 6. Распределение приемно-усилительных ламп в аппаратуре по коэффициенту нагрузки.

Для создания облегченных режимов работы элементов радиоэлектронной аппаратуры целесообразно:

питающие напряжения в схемах применять минимально допустимой величины; это ведет к уменьшению уровня электрической нагрузки деталей и повышению надежности аппаратуры; питание цепей накала ламп стабилизировать, что исключает опасность излишнего нагрева катода и увеличивает срок службы ламп;

коэффициент запаса для сопротивлений по мощности, а для конденсаторов по напряжению брать равными 2, т. е. иметь для сопротивлений и конденсаторов $K_н \approx \approx 0,5$; опыт показывает, что при рабочем напряжении на конденсаторе в 2 раза ниже номинального вероятность повреждений конденсаторов различных типов снижается в 5—10 раз.

Надежность работы радиоэлектронной аппаратуры в большой степени зависит от ее теплового режима. Перегрев отдельных элементов и узлов аппаратуры приводит к изменениям их параметров, ухудшению работы аппаратуры, а иногда и выходу ее из строя.

Обеспечение нормального теплового режима работы деталей тем сложнее, чем меньше общие габариты аппаратуры. Часто тяжелые тепловые режимы являются результатом недостаточно продуманной конструкции и монтажа аппаратуры.

Так, в некоторых типах телевизоров чувствительные к перегреву детали и элементы — полупроводниковые приборы, конденсаторы, контурные катушки генераторов и др. — располагались непосредственно над элементами схемы, выделяющими большое количество тепла: электронными лампами, силовыми трансформаторами, сопротивлениями с большой мощностью рассеивания.

В результате этого наблюдались случаи большого ухода частоты синхронизатора, нарушения устойчивости работы других узлов и телевизоров в целом.

Для облегчения тепловых режимов работы деталей необходимо при конструировании аппаратуры все чувствительные к высокой температуре элементы схем — конденсаторы, полупроводниковые приборы, термисторы и т. п. — располагать как можно дальше от источников, излучающих тепло, от восходящих потоков теплового воздуха, а при монтаже и сборке аппаратуры держать подальше от них включенный паяльник.

Облегчение теплового режима достигается также специальными мерами для отвода тепла и методами принудительного охлаждения аппаратуры.

Системы охлаждения аппаратуры могут быть общими и локальными.

С помощью общих систем охлаждается аппаратура в целом; с помощью локальных систем охлаждаются отдельные элементы и узлы аппаратуры, находящиеся в наиболее тяжелом тепловом режиме работы.

В системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры применяются различные способы: естественное воздушное охлаждение, принудительное воздушное охлаждение, жидкостное охлаждение и др.

Конкретный выбор наиболее рационального способа охлаждения аппаратуры при ее проектировании зависит от назначения аппаратуры и ее сложности.

Для повышения электрической и механической прочности и надежности радиоэлектронной аппаратуры при ее конструировании и монтаже применяется и ряд других мероприятий, подсказанных опытом. Перечислить все эти мероприятия в небольшой брошюре нет возможности. Укажем в качестве примера лишь некоторые из них.

При работе аппаратуры в условиях высокой влажности применяют покрытие всех деталей и монтажа

специальными влагостойкими лаками, что устраняет возможность появления утечек при наличии влаги.

Рекомендуется избегать применения моточных изделий в открытом исполнении, так как в результате воздействия влаги снижается сопротивление изоляции, возникает возможность пробоев и коротких замыканий в цепях питания аппаратуры. Необходимо применять трансформаторы и дроссели, залитые различными компаундами, а еще лучше с вакуумной герметизацией.

Опасность пробоя при повышенных напряжениях устраняется герметизацией блоков, требующих больших питающих напряжений (передатчики, выпрямители и т. п.).

Применение печатного монтажа радиоэлектронной аппаратуры существенно повышает ее надежность.

Защита аппаратуры от воздействия ударов и вибраций обеспечивается применением соответствующей амортизации.

Для увеличения механической прочности аппаратуры ее тяжелые детали — трансформаторы, дроссели и др. — располагают в местах, имеющих наибольшую жесткость, например по углам шасси.

Конденсаторы и сопротивления большого веса, помимо закрепления выводов пайкой, имеют дополнительные крепления скобками или хомутиками.

Детали небольшого веса крепят на выводах с минимальной длиной, допустимой техническими условиями.

Создание для деталей разгруженных, облегченных режимов работы, хороший теплоотвод и охлаждение, принятие ряда других дополнительных мер существенно повышают надежность радиоэлектронной аппаратуры.

Однако всех этих мер иногда оказывается недостаточно, так как современная радиоэлектронная аппаратура становится все более сложной. Растет количество деталей, применяемых в различных образцах аппаратуры. Так, например, в некоторых образцах электронных вычислительных машин применяется по нескольку десятков тысяч, а иногда и сотен тысяч отдельных деталей.

Ненадежная работа хотя бы одной из этих деталей и связанная с этим возможность искажения отдельных операций могут привести к ошибочным результатам всей цепи сложных вычислений, проведенных машиной.

Мы уже говорили, что надежность радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени зависит от количества и надежности используемых в ней деталей.

Обеспечить необходимую надежность аппаратуры за счет повышения надежности входящих в нее деталей не всегда удается, так как при большом количестве деталей требуется такая высокая степень их надежности, которую не могут дать все перечисленные мероприятия.

В этих условиях особое значение приобретает проблема создания надежной аппаратуры из менее надежных элементов.

«В решении проблемы надежности имеется множество трудных теоретических, строго научных вопросов.. Сюда относится, например, проблема о построении сложной системы, обладающей более высокой надежностью, чем ее составные элементы, т е. проблема создания надежной системы из менее надежных элементов»,— говорит акад. А. И. Берг.

Ту же мысль подчеркивает акад В А Трапезников, называющий проблему надежности «ключевой проблемой» «Решение этой проблемы должно идти, — говорит он, — как по линии разработки более надежных видов элементов и способов их соединения, так и по пути изыскания методов построения надежных систем из ненадежных элементов».

Одним из возможных путей повышения надежности аппаратуры при использовании в ней менее надежных элементов является метод резервирования. Рассмотрим его несколько подробнее.

В теории надежности, как и в электротехнике, рассматривают два возможных вида соединения элементов: последовательное и параллельное. Однако понимание этих видов соединений в теории надежности и электротехнике различное. Последовательным соединением элементов в теории надежности называется такое соединение, при котором отказ в работе хотя бы одного элемента приводит к отказу аппаратуры в целом.

Этот вид соединения является основным, наиболее характерным и распространенным для большинства типов радиоэлектронной аппаратуры.

Параллельным или резервным соединением элементов в теории надежности считается такое соединение, при котором отказ аппаратуры наступает только в слу-

чае выхода из строя всех параллельно (резервно) включенных элементов.

Следовательно, резервированием называется способ повышения надежности аппаратуры путем включения в схему ряда параллельных, резервных, элементов.

Почему резервирование обеспечивает повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры и каково может быть это повышение? Рассмотрим для наглядности этот вопрос на конкретном примере.

Допустим для простоты, что мы имеем какой-либо радиоэлектронный прибор, состоящий из двух элементов: *А* и *Б*, обладающих одинаковой надежностью, равной 0,9.

При последовательном соединении элементов общая надежность прибора, как мы уже говорили об этом в гл. 4, равна произведению надежностей обоих элементов, т. е. $P_{\text{посл}} = P_{\text{А}} P_{\text{Б}} = 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 0{,}81$.

Общая надежность аппаратуры при последовательном соединении элементов всегда ниже надежности самого худшего элемента.

Какова же надежность прибора при параллельном соединении двух указанных элементов, т. е. при дублировании основного элемента *А* разервным элементом *Б*?

Надежность работы двух параллельно включенных элементов, т. е. вероятность того, что по крайней мере один из них будет работать, равна сумме вероятностей трех возможных благоприятных исходов:

1) ни элемент *А*, ни элемент *Б* не выйдут из строя;

2) элемент *А* выйдет из строя, но элемент *Б* будет работать;

3) элемент *Б* выйдет из строя, но элемент *А* будет работать.

Математически это выражается следующим образом:

$$P_{AБ} = P_A P_Б + P_Б (1 - P_A) + P_A (1 - P_Б),$$

или в настоящем случае

$$P_{AБ} = 0{,}9 \cdot 0{,}9 + 0{,}9 (1 - 0{,}9) + 0{,}9 (1 - 0{,}9) = 0{,}99.$$

Если при последовательном соединении элементов общая надежность аппаратуры ниже надежности самого худшего элемента, то при параллельном соединении

общая надежность аппаратуры выше надежности самого лучшего элемента.

Следовательно, при параллельном включении, т. е. при применении метода резервирования, можно получить более высокую степень надежности аппаратуры при использовании в ней даже недостаточно надежных деталей. В этом принципиальное отличие метода резервирования от всех других способов повышения надежности.

В нашем примере надежность прибора, состоящего всего из двух параллельно включенных элементов, оказалась на 10% выше надежности каждого элемента в отдельности и на 20% с лишним выше надежности прибора при последовательном соединении элементов.

Расчеты показывают, что с помощью резервирования можно добиваться повышения надежности аппаратуры в несколько раз.

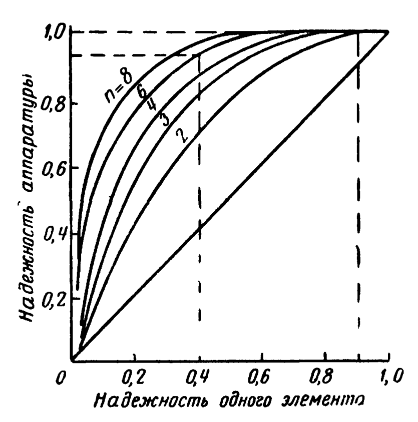


Рис. 7. Надежность аппаратуры, состоящей из n параллельных равнонадежных элементов.

Зависимость надежности аппаратуры от количества параллельно включенных элементов показана на рис. 7.

На нем по оси абсцисс отложена надежность используемых в аппаратуре элементов; кривые обозначают количество примененных элементов, а ось ординат показывает общую надежность аппаратуры.

Для того, например, чтобы определить общую надежность аппаратуры в описанном выше случае, т. е. для аппаратуры, состоящей из двух параллельно соединенных элементов с надежностью каждого 0,9, откладываем по оси абсцисс надежность, равную 0,9. Из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей двум элементам, и из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось ординат. Точка на оси ординат показывает, что общая надежность аппаратуры в данном случае равна 0,99.

Подобным же образом можно определить, что при надежности используемых в аппаратуре элементов, равной 0,4, и при шести элементах общая надежность аппаратуры равна примерно 0,92.

Существуют два основных метода резервирования:

резервирование общее, т. е. резервирование аппаратуры в целом;

резервирование раздельное, т. е. резервирование аппаратуры по элементам или узлам.

Оба эти способа графически показаны на рис. 8 и 9.

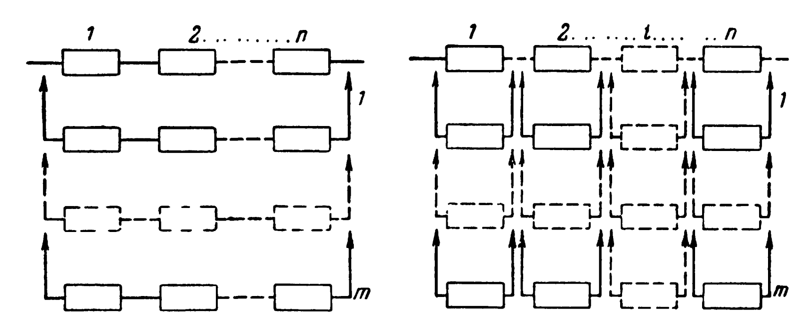


Рис. 8. Общее резервирование. Рис. 9. Раздельное резервирование.

При общем резервировании резервные элементы и цепи, а также режимы их работы выбираются такими же, как и для основных элементов и цепей.

Анализ показывает, что при одном и том же количестве резервных элементов раздельное, поэлементное резервирование обеспечивает большее повышение надежности, чем общее резервирование.

В зависимости от характера и особенностей различных видов радиоэлектронной аппаратуры применяются два способа включения резервных элементов и цепей:

постоянное включение резервных элементов на все время эксплуатации;

включение резервных элементов способом замещения отказавших элементов.

Основным достоинством резервирования при постоянном включении резерва является его простота, так как при этом не требуется никаких переключающих устройств и устройств сигнализации отказа.

Применение постоянного включения резервных элементов может быть целесообразным при резервировании отдельных каскадов, небольших блоков аппаратуры и т. п.

При включении резерва способом замещения один резервный элемент можно использовать на несколько рабочих элементов. Преимуществом резервирования способом замещения является также и то, что режим работы резервных элементов остается постоянным и поэтому включение их не требует дополнительных регулировок аппаратуры. Кроме того, надежность резервных элементов сохраняется более длительное время, так как до момента их включения они находятся в нерабочем состоянии.

Преимущества резервирования способом замещения по сравнению с постоянно включенным резервом возрастают с понижением надежности резервируемых элементов.

Применение резервирования способом замещения является более целесообразным в сложной радиоэлектронной аппаратуре, от которой требуется высокая надежность работы в течение длительного времени, например в радиорелейных линиях связи, крупных радиоузлах и пр.

Различают резервы «горячий» и «холодный» в зависимости от режима ламп, имеющих накаливаемый катод.

Применение «горячего» резерва сокращает время, необходимое для переключения схемы с отказавшего элемента на резервный.

При «холодном» резерве увеличивается срок службы резервных элементов.

Наиболее эффективным приемом резервирования является применение раздельного резервирования со способом включения замещением при обеспечении возможности замены каждым резервным элементом большого количества однотипных рабочих элементов.

Применение резервирования является одним из наиболее действенных способов повышения надежности радиоэлектронных устройств.

Однако необходимо иметь в виду, что применение резервирования неизбежно ведет к усложнению аппаратуры, увеличению ее веса и габаритов.

Поэтому при проектировании радиоэлектронной аппаратуры применение в ней резервирования целесообразно лишь тогда, когда исчерпаны все остальные, более простые способы повышения надежности и когда в этом имеется крайняя необходимость.

В свете сказанного выше очень важное значение для повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры приобретает проблема микроминиатюризации.

Суть проблемы микроминиатюризации заключается в том, чтобы максимально уменьшить габариты и вес всех основных радиодеталей и увеличить их плотность в сборке при одновременном повышении надежности аппаратуры и обеспечении возможности автоматизации ее производства.

Решить проблему микроминиатюризации простым уменьшением габаритов и веса существующих радиодеталей нельзя. Требования повышения надежности аппаратуры и ее способности работать в условиях предельных нагрузок приводят к необходимости коренных изменений в конструкции и технологии изготовления электронных деталей и устройств.

Создание новых деталей вызывает необходимость применения и новых систем их сборки и конструирования аппаратуры.

Наилучшей системой, дающей возможность осуществить максимальное сокращение габаритов радиоэлектронной аппаратуры при одновременном повышении ее надежности, является микромодульная система. Микромодули становятся в настоящее время практическим воплощением микроминиатюризации.

Повышенная прочность микромодулей, их меньшая подверженность ударным и вибрационным воздействиям, хорошая герметизация и защищенность от влияния окружающей среды, способность работать в более широком диапазоне температур значительно повышают надежность аппаратуры, собранной при помощи микромодулей.

Мы уже говорили выше, что наряду с вероятностью безотказной работы аппаратуры важнейшим показателем ее надежности является ее ремонтопригодность Поэтому при конструировании радиоэлектронной ап-

паратуры весьма важно предусмотреть все возможные меры к уменьшению времени, необходимого на отыскание и устранение возникающих в ней неисправностей.

Применение микромодульной системы построения аппаратуры и с этой точки зрения весьма целесообразно.

При таком построении аппаратуры ее ремонт производится путем простой замены вышедших из строя узлов или блоков, на что требуется минимальное время.

Сменные блоки могут быть переданы на ремонт в специальные мастерские.

Опыт эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры показывает, что для нахождения причин ее неисправности затрачивается часто значительно больше времени, чем на их устранение.

Поэтому весьма важно обеспечить возможность быстрейшего обнаружения и нахождения любой неисправности аппаратуры. Эту задачу значительно облегчает применение так называемого встроенного контроля надежности работы. Суть его состоит в том, что в составе самой аппаратуры предусматривается наличие соответствующих контрольно-измерительных приборов, которые непрерывно контролируют основные параметры аппаратуры. В случае их изменения сверх допустимых пределов система контроля дает сигнал, который либо выключает неисправные элементы и включает взамен их исправные, либо сигнализирует о необходимости ремонта аппаратуры.

Этап проектирования заканчивается изготовлением образца и его испытаниями, в ходе которых проверяются расчетные данные и фактически полученные параметры, в том числе запроектированная надежность.

Существуют различные методы испытания аппаратуры. Наиболее эффективным методом проверки надежности радиоэлектронной аппаратуры в процессе ее разработки является метод граничных испытаний: сущность его состоит в том, что режим работы испытываемой аппаратуры изменяют до тех пор, пока один из ее элементов или узлов не выйдет из строя.

Метод граничных испытаний дает возможность практически оценить надежность используемого образца, помочь конструктору выявить его слабые места и создать в этих местах необходимый запас прочности.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Надежность любого образца радиоэлектронной аппаратуры, заложенная на этапе его проектирования, должна быть закреплена и обеспечена в процессе его серийного производства.

Какие же мероприятия могут способствовать обеспечению высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры при ее серийном производстве?

Одним из важных мероприятий является хорошо поставленный входной контроль всех материалов и комплектующих элементов, поступающих от заводов-смежников.

О значении входного контроля достаточно наглядно говорят следующие цифры: на заводах, выпускающих телевизоры, стоимость рабочей силы, т. е. стоимость всех трудовых затрат, начиная от изготовления отдельных элементов и узлов телевизоров и кончая их монтажом и сборкой, составляет примерно всего одну десятую часть стоимости комплектующих изделий, поступающих в своем большинстве с других заводов.

Такое же положение характерно и для других видов радиоэлектронной аппаратуры.

В этих условиях только жесткий, хорошо организованный входной контроль всех поступающих материалов и комплектующих изделий может обеспечить высокую надежность серийно выпускаемой аппаратуры.

Чем сложнее и ответственнее выпускаемая радиоэлектронная аппаратура, чем больше номенклатура и количество используемых в ней материалов и деталей, тем строже и тщательнее должен быть организован их входной контроль.

Особую роль в повышении надежности большинства изделий радиоэлектронной промышленности играют общая культура производства и личная гигиена производственного персонала. Под культурой производства, особенно в таких отраслях промышленности, как вакуумная, полупроводниковая и радиотехническая, мы понимаем совершенство технологического процесса и его строгое соблюдение, поддержание в лабораториях и цехах высокой чистоты, постоянства влажности и темпе-

ратуры, обеспечение пыленепроницаемости и кондиционирования воздуха и т. п., а также максимальную автоматизацию как в производстве отдельных элементов и деталей, так и при сборке и монтаже всего изделия.

Большое значение имеет приспособленность самих производственных помещений, лабораторных и цеховых площадей для поддержания в них высокой культуры производства. Соответствующие условия должны предусматриваться уже при проектировании и строительстве новых предприятий радиоэлектронной промышленности. К сожалению, при создании многих промышленных предприятий эти соображения мало учитывались.

Очень важно поддержание высокой чистоты во всех производственных помещениях. Пыль и грязь несовместимы ни с одной из технологических операций. Чистота рабочего места — это самая первая, элементарная ступень в культуре производства. Особо важное значение она имеет в радиоэлектронной промышленности.

В некоторых производственных процессах радиотехнической промышленности прикосновение пальцев рук к элементам изделий может вызвать коррозию или другие качественные изменения. Например, следы пота от пальцев на слюдяных пластинках, применяемых в производстве высокочастотных конденсаторов, могут резко увеличить в них угол потерь.

Особые условия чистоты и режима окружающей обстановки требуются в производстве полупроводниковых германиевых и кремниевых приборов, долговечных электронных ламп, аппаратуры различных устройств, работающих в течение длительного времени без обслуживания, и т. п.

О том, насколько высоки требования к производственным операциям при изготовлении указанных приборов, можно судить, например, по тому, что в производстве электролитических конденсаторов применяется тонкая алюминиевая фольга чистотой 99,9%, а в полупроводниковых приборах — монокристаллический однородный германий и кремний, примеси в которых не превышают одного атома на 100 млн. атомов германия или кремния.

Очень большое значение в этих условиях приобретает личная гигиена производственного персонала. Аме-

риканская фирма Сперри Жироскоп, изготовляющая аппаратуру управления летающими снарядами, утверждает, что частица перхоти, попавшая на точный подшипник аппаратуры управления, может вызвать отклонение снаряда от цели на несколько миль.

Совершенствование технологического процесса изготовления радиоэлектронной аппаратуры является трудной и сложной задачей. Радиоэлектронная промышленность имеет свыше 40 самостоятельных видов производства, применяющих тысячи различных технологических рецептов и использующих сотни типов специального технологического оборудования.

Быстрый рост радиоэлектронной промышленности и совершенствование ее технологии создали предпосылки для перехода к комплексной механизации и автоматизации производства радиоэлектронной аппаратуры.

Значение автоматизации для повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры каждому очевидно. Чем выше будет автоматизация производственных процессов ее изготовления, тем меньше погрешностей, вносимых индивидуальными особенностями человека, выше однородность продукции, больше возможностей для сужения допусков.

Автоматизация сборки и монтажа сложных изделий должна исключить дефекты, возникающие при ручной сборке и монтаже, которые до настоящего времени еще очень велики.

Большое значение для внедрения автоматизации производства и повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры при ее серийном выпуске могут играть стандартизация и унификация не только отдельных деталей, но и схем, каскадов и блоков. Унифицирована может быть широкая номенклатура типовых схем: видеоусилители, усилители низкой частоты, блокинг-генераторы, катодные повторители и т. п.

В ходе серийного производства радиоэлектронной аппаратуры проводятся специальные испытания на надежность как элементов, так и готовых изделий. Эти испытания будут тем эффективнее, чем больше они будут приближаться к реальным условиям последующей эксплуатации данного вида аппаратуры. При серийном производстве, как и при разработке нового образца радиоэлектронной аппаратуры, часто весьма полезным

оказывается применение метода граничных испытаний, о котором уже было сказано выше.

Большую пользу может принести организация опытной эксплуатации выпускаемой аппаратуры. Опытная эксплуатация позволяет практически оценить надежность аппаратуры, выявить ее слабые места, обеспечить возможность прогнозирования отказов.

Наряду с проведением опытной эксплуатации должен быть организован сбор информации о всех случаях отказов и неисправностей аппаратуры, находящейся в реальных условиях эксплуатации.

Правильно организованная опытная эксплуатация, регулярное получение и анализ данных о всех неисправностях аппаратуры, находящейся в практической работе, обеспечивают возможность принятия эффективных мер к устранению всех обнаруженных недостатков при разработке новых образцов аппаратуры или модернизации существующих.

Невыполнение этого требования приводит к тому, что и в новых моделях аппаратуры, как это имело место с многими типами телевизоров, повторяются старые конструктивные и производственные недостатки, снижающие надежность аппаратуры.

Качество любого промышленного изделия не может поддерживаться на требуемом уровне без постоянного контроля его в процессе производства. Поэтому установление наиболее рациональной системы контроля качества имеет очень большое значение для обеспечения высокой надежности технических изделий, в том числе и радиоэлектронной аппаратуры.

Для повышения надежности очень важно установление тесной связи между контролем качества, конструктивной отработкой образца и производственным процессом его изготовления.

Наиболее отвечающими этим задачам являются статистические методы анализа и контроля качества. Эти методы находят в последнее время все более широкое применение в самых различных отраслях промышленности как у нас, так и за границей.

В чем же преимущества статистического метода контроля качества, в чем его отличие от обычных, ранее применявшихся методов контроля?

При старых методах контролеры ОТК, проверяя качество готовой продукции на соответствие ее заданным техническим условиям, являлись по существу лишь регистраторами качества. Никакого воздействия на улучшение технологии производства они не оказывали, их роль в производственном процессе была чисто пассивной.

Считалось, что для полной (100%) гарантии качества продукции необходима 100-процентная проверка контролируемых изделий. Это требовало, естественно, очень большого штата контролеров ОТК.

Однако даже такой контроль не гарантировал должного качества продукции из-за объективных ошибок измерений, обусловленных состоянием измерительных приборов, субъективных ошибок измерений из-за недостаточной внимательности контролеров-браковщиков и других причин.

Статистические методы контроля основаны на использовании методов математической статистики.

Объектом контроля являются не единичные изделия, а общие признаки качества серийных изделий. При статистическом методе контроля нет необходимости в 100-процентной проверке, а достаточно судйть о качестве партии изделий на основании контроля некоторой ее части (выборки, пробы). Оценка качества партии позволяет определить вероятность общего качества и надежности изделий данного типа.

Одновременно с проверкой качества продукции статистический контроль осуществляет систематическое наблюдение за ходом производства и состоянием технологического процесса.

Статистический контроль бывает двух видов: приемочный и текущий.

Приемочный статистический контроль состоит в проверке качества партий уже изготовленных изделий путем проверки отдельных выборок из них.

Текущий статистический контроль осуществляется в процессе изготовления изделий и имеет целью не столько контроль качества изготовляемой партии, сколько контроль состояния производственного процесса, которое обеспечивает требуемое качество изделий.

Статистические методы контроля позволяют поэтому своевременно определить угрозу ухудшения качества и

надежности продукции и принять необходимые меры для поддержания технологического процесса в должном состоянии путем своевременных подналадок.

Таким образом, статистические методы контроля в отличие от старых методов позволяют не только контролировать, но и регулировать качество и надежность серийно выпускаемых изделий.

Статистические методы контроля становятся особенно эффективными при максимальной механизации и автоматизации контрольных и вычислительных операций.

Широкому внедрению статистических методов контроля качества в радиоэлектронной промышленности уделяется в настоящее время большое внимание.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ
ПОДДЕРЖАНИЕ НАДЕЖНОСТИ АППАРАТУРЫ В ХОДЕ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Какие бы меры по повышению надежности радиоэлектронной аппаратуры ни принимались в процессе ее проектирования и серийного производства, все же если она будет эксплуатироваться неправильно, работа ее окажется ненадежной и недолговечной.

Наоборот, при правильно организованной эксплуатации, при своевременном проведении необходимых профилактических мероприятий и ремонта аппаратуры надежность ее может поддерживаться на заданном уровне длительное время, во много раз превосходящее гарантийные сроки.

Надежность аппаратуры при ее эксплуатации зависит как от субъективных факторов, т. е. от квалификации и опыта обслуживающего персонала, так и от объективных факторов, т. е. конкретных условий и особенностей эксплуатации аппаратуры.

Как показывает опыт, до 20% всех отказов радиоэлектронной аппаратуры происходит по вине обслуживающего персонала. Для правильной организации эксплуатации аппаратуры и уменьшения количества неисправностей, происходящих по вине обслуживающего персонала, очень большое значение имеет качество технической документации, придаваемой к аппаратуре.

Вся радиоэлектронная аппаратура бытового назначения — телевизоры, радиоприемники, радиолы, — выпускаемая из года в год во все бо́льших количествах и представляющая собои сравнительно сложные техни ческие устройства, эксплуатируется лицами, не обладающими в большинстве случаев необходимыми познаниями в области радиоэлектроники.

В этом отношении радиоэлектронная аппаратура находится в значительно менее выгодном положении, чем, скажем, автомашины, мотоциклы или мотороллеры

Ведь любои гражданин, приобретая автомашину или мотороллер, получает право практически пользоваться ими («шоферские права») лишь после того, как Госавтоинспекция проверит его знания как по технике вождения машины, так и по правилам ухода за нею.

Когда гражданин покупает телевизор, радиолу, магнитофон или любой другой образец радиоэлектронной аппаратуры, никакая инспекция познаний его в области радиоэлектроники не проверяет и никаких специальных разрешений на право пользования приобретенной аппаратурой не дает. Да и было бы странно, если было бы иначе.

В этих условиях особое значение приобретает техническая документация, прилагаемая к радиоэлектронной аппаратуре бытового назначения Ведь она является обычно единственным документом, которым руководствуются владельцы аппаратуры при ее использовании

Поэтому очень важно, чтобы техническая документация, придаваемая к радиоэлектронной аппаратуре, была составлена возможно подробнее, с приложением необходимых схем и перечня деталей, чтобы изложена она была максимально просто и доходчиво, чтобы она содержала понятные каждому указания и советы о порядке пользования аппаратурой, ее хранении и сбережении.

Наиболее характерными проявлениями неправильной эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры в результате недостаточных знаний и опыта обращения с нею являются: неточная установка напряжения питания, нарушение правил включения и выключения аппаратуры, неправильная установка органов управления и регулирования, установка самодельных предохранителей и т. п.

Если радиоэлектронная аппаратура бытового назначения используется в относительно благоприятных комнатных условиях (сравнительное постоянство температуры, влажности, отсутствие механических воздействий), то аппаратура служебного назначения, особенно переносная и полевая, может эксплуатироваться в самых различных и сложных климатических и механических условиях.

Поэтому для надежности ее работы наряду с субъективными факторами важнейшее значение имеют и объективные факторы. Технический персонал, обслуживающий радиоэлектронную аппаратуру, должен знать воздействие на нее различных внешних факторов.

Наибольшее влияние на надежность работы аппаратуры при ее эксплуатации оказывают резкое изменение окружающей температуры, высокая влажность и различные механические воздействия.

Влияние повышенной температуры проявляется в самых разнообразных формах. Появляются различные повреждения электровакуумных приборов — ухудшение вакуума, ускоренный износ катода и др. Портятся изоляционные материалы, уменьшается сопротивление изоляции, увеличивается опасность пробоев. Нарушается герметичность конденсаторов, трансформаторов и других элементов, начинают вытекать заливочные и пропиточные компаунды. В результате разрушения эмалевой изоляции в моточных изделиях появляются короткозамкнутые витки, что приводит к изменению электрических параметров этих изделий. Изменение параметров некоторых элементов (индуктивности, емкости, сопротивления) нарушает регулировку электрических схем, приводит к отказам аппаратуры.

Низкая температура значительно усложняет эксплуатацию аппаратуры. Затрудняется запуск агрегатов питания, увеличивается время развертывания и свертывания антенно-фидерных устройств. Воздействие низкой температуры приводит к разрушению обычной, неморозостойкой, резины, в результате чего уменьшается гибкость и увеличивается хрупкость кабелей. Растрескивание заливочных компаундов ведет к нарушению герметичности различных элементов. Сгущение смазки повышает нагрузку в механических узлах. Под влиянием низкой температуры отдельные элементы

схемы меняют свои параметры, что приводит к расстройке и нарушению нормальных режимов работы всей аппаратуры.

Сильно сказывается на надежности работы аппаратуры и повышение влажности. Под воздействием влажности появляются различные утечки, резко увеличивается опасность поверхностных пробоев, растут высокочастотные потери, увеличивается емкость электрического монтажа. Все это вызывает расстройки аппаратуры, а иногда и отказы ее.

Большое влияние оказывают различные механические воздействия на аппаратуру. Под действием вибраций и ударов происходят различные механические повреждения многих элементов схемы и в первую очередь электровакуумных приборов, в которых наблюдаются замыкания электродов, обрыв подогревателя, ослабление крепления траверс, появление трещин в стекле и т. п. Действие ускорений приводит к ослаблению крепления деталей, к нарушению контактов в различных соединениях. В результате искрения на неустойчивых контактах появляются сильные помехи.

Если обслуживающий состав будет хорошо знать влияние на надежность работы аппаратуры различных внешних факторов, он всегда сможет принять меры к устранению или уменьшению вредного воздействия этих факторов.

Надежность и долговечность работы радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени зависят от своевременного проведения необходимых профилактических мероприятий, а также правильной организации ремонта аппаратуры.

Профилактические работы, которые иногда называют планово-предупредительным ремонтом, имеют своей задачей предупредить возможные отказы и неисправности аппаратуры путем ее регулярного осмотра и своевременного принятия необходимых предупредительных мер.

Система ремонта служит для устранения отказов и неисправностей, которые могут иметь место в аппаратуре, несмотря на проведение профилактических работ.

Большое значение для обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры имеют условия ее хранения, транспортировки и упаковки. К сожалению, этим вопро-

сам, особенно упаковке и транспортировке, далеко не всегда уделяется должное внимание.

Между тем неправильная упаковка аппаратуры часто уже на ее первом пути от завода на склад или непосредственно к потребителю приводит к различным механическим повреждениям как внешним, так и внутренним.

К серьезным неисправностям и поломкам аппаратуры может привести и небрежная транспортировка: погрузка аппаратуры навалом, без соблюдения «верха» и «низа» ее упаковки, без соответствующего закрепления ее в автомашинах или железнодорожных вагонах.

Не всегда обеспечиваются и необходимые условия для хранения радиоэлектронной аппаратуры. Для длительного хранения радиоэлектронной аппаратуры требуется закрытое отапливаемое помещение, в котором должны поддерживаться нормальные температура и влажность.

Очень ответственной задачей при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры являются сбор, изучение и обобщение данных о ее надежности, о всех имевших место отказах и неисправностях в ее работе.

Эти данные крайне необходимы как при проектировании новой радиоэлектронной аппаратуры, так и при ее массовом серийном производстве. Только на основе тщательного изучения и обобщения данных эксплуатации можно обеспечить дальнейшее повышение надежности и долговечности всей радиоэлектронной аппаратуры.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОБЩЕГОСУДАРСТВЕННЫЙ ХАРАКТЕР ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ

Можно ли успешно решить проблему надежности радиоэлектронной аппаратуры, ограничиваясь лишь рамками одной радиоэлектронной промышленности? Рассмотрим этот вопрос подробнее, хотя бы на примере с телевизорами.

Мы упоминали в начале брошюры о недостаточной надежности многих типов телевизоров. Но ведь телевизор состоит из нескольких сотен самых разнообразных деталей и материалов.

В него входят телевизионная трубка и различные электронные лампы, ряд полупроводниковых приборов, большое количество сопротивлений и конденсаторов, провода и кабели, измерительные приборы и т. п.

Как сказано выше, на долю электровакуумных и полупроводниковых приборов приходится до 40—50% всех отказов.

Значительная часть этих отказов является следствием недостаточной культуры производства и несоблюдения технологического процесса на заводах электровакуумной и полупроводниковой промышленности.

Но может ли электровакуумная промышленность всегда обеспечить требуемые качество, надежность и долговечность электронных ламп и трубок одними своими силами?

Конечно, она несет прямую ответственность за качество своих изделий. И это совершенно справедливо, так как, например, 25% брака телевизионных трубок относятся к производственным дефектам их изготовления (пятно на экране, нарушение вакуума и т. п.).

Однако надежность и долговечность электровакуумных изделий в очень большой степени зависят от качества исходных материалов, используемых при их изготовлении: от качества стекла для баллонов ламп и трубок, от качества металлов, идущих на изготовление электродов, и т. п.

Большой процент неисправностей телевизоров происходит из-за низкого качества применяемых в них сопротивлений и конденсаторов.

Но ведь надежность сопротивлений и конденсаторов в свою очередь в значительной степени зависит от качества используемых в них металлов, керамики, слюды, бумаги и ряда других материалов, изготовляемых самыми различными отраслями промышленности.

Такое же положение имеет место и с входящими в телевизор полупроводниковыми приборами, кабелями и проводами и т. п.

Если мы внимательно просмотрим все комплектующие изделия и материалы, поступающие на заводы-изготовители телевизоров со стороны, мы увидим, что производство телевизоров, а следовательно, и их качество и надежность в той или иной степени связаны с рабо-

той очень многих отраслей промышленности.

Это справедливо не только для телевизоров, но и для любой другой радиоэлектронной аппаратуры, и чем она сложнее, тем больше ее связь и зависимость от уровня и качества работы многих отраслей промышленности.

Мы напоминаем об этом отнюдь не для того, чтобы снять, скажем, с заводов-изготовителей телевизоров ответственность за их качество и надежность работы. Такой вывод был бы совершенно неверным.

Во-первых, значительный процент брака тех же телевизоров происходит непосредственно по вине самих заводов, их изготовляющих, и этот брак никакого отношения к работе других отраслей промышленности не имеет.

Во-вторых, заводы, изготовляющие телевизоры, как и любые другие заводы радиоэлектронной промышленности, продукция которых зависит от большого количества поступающих со стороны материалов и комплектующих изделий, должны организовать самый тщательный и жесткий входной контроль, как говорилось в гл. 7.

Хорошо организованный входной контроль должен ограничить возможность проникновения некачественных материалов и деталей в производство радиоэлектронной аппаратуры.

Говоря о зависимости радиоэлектронной аппаратуры от работы многих других отраслей промышленности, нужно подчеркнуть, что кардинальное решение проблемы надежности может быть обеспечено лишь при одновременной, повседневной и настойчивой борьбе за качество и надежность продукции во всех отраслях промышленности, что проблема надежности не только приобрела в настоящее время государственное значение, но и должна решаться в общегосударственном масштабе усилиями многих отраслей промышленности и при непосредственном участии всей нашей советской общественности.

Успешное решение этой проблемы требует соответствующей подготовки инженерно-технических и рабочих кадров. Особое значение это имеет для радиоэлектронной промышленности, аппаратура которой играет решающую роль во всех процессах автоматизации и многих областях науки и техники.

Сложность современной радиоэлектронной аппаратуры, большое число применяемых в ней деталей, многообразие используемых материалов, различие режимов ее применения приводят, как мы видели, к тому, что надежность аппаратуры становится зависимой от множества «случайных» причин.

Поэтому при рассмотрении вопросов надежности, выработке ее количественных показателей, определении путей ее повышения широко используются теория вероятностей и математическая статистика, позволяющие исследовать взаимосвязь большого количества воздействующих на надежность переменных и случайных величин.

Основными методами, которые применяются при решении проблемы надежности, являются методы математической статистики. Статистические методы исследования позволяют извлекать максимум полезной информации из минимального количества данных.

Исследование вопросов надежности связано и с рядом других отраслей науки и техники.

Однако основные вопросы проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры все более приобретают важнейшее самостоятельное значение. Теория надежности определяется как новая, отдельная отрасль науки.

Главным содержанием теории надежности являются: исследование причин и факторов, влияющих на надежность готовых изделий и их взаимосвязь и зависимость; разработка количественных определений и показателей надежности и методов их инженерного расчета; оценка возможностей прогнозирования и испытания надежности и определения ее величины в процессе проектирования, производства и эксплуатации; определение наиболее эффективной системы сбора и анализа статистических данных о надежности аппаратуры и ряд других вопросов.

Становится совершенно очевидной необходимость включения в программы вузов и техникумов, в первую очередь радиотехнического профиля, специального курса о надежности радиоэлектронной аппаратуры.

В настоящее время в некоторых высших технических учебных заведениях уже начали изучать отдельные вопросы проблемы надежности.

Вместе с инженерно-техническим составом промышленности проблему надежности должны решать наши

рабочие кадры, пополнение которых готовится главным образом в системе профессионально-технического образования.

Большую роль в повышении надежности и долговечности изделий радиоэлектроники и используемых исходных материалов и элементов могут сыграть наши советские радиолюбители.

Нет ни одного серьезного промышленного предприятия, где бы не развивалось радиолюбительство.

Кто другой, как не радиолюбитель, на своих конструкциях давно осознал важность проблемы повышения надежности и долговечности электронно-лучевых трубок, ламп, конденсаторов, трансформаторов и многих других элементов, ненадежность которых не раз приносила ему немало огорчений.

Полезную работу могут выполнить радиоклубы ДОСААФ и различные радиотехнические кружки, наблюдая причины, вызывающие отказы в работе радиоэлектронных изделий, и изучая физику старения исходных материалов, из которых изготовляются радиоэлементы.

Каждый завод, ОКБ или институт с благодарностью примет от радиолюбителей итоговые материалы таких наблюдений.

В отдельных, наиболее характерных случаях следует одновременно прикладывать вышедшие из строя радиоэлементы с описанием режимов и всех обстоятельств, при которых произошел отказ.

Кому другому, как не радиолюбителю, следует в первую очередь на своем предприятии возглавить работу за повышение культуры производства и изучение всех причин, которые порождают выпуск изделий низкой надежности и долговечности.

Вопросы повышения надежности и долговечности изделий радиоэлектроники и факторы, их определяющие, должны стать постоянной темой изучения в радиоклубах ДОСААФ и радиокружках.

Многое может быть сделано радиоклубами и кружками и в области сбора и обработки информации об отказах, возникающих в радиолюбительских конструкциях, информации крайне важной и полезной для радиоэлектронной промышленности.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА РУБЕЖОМ

Вопросы надежности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры играют большую роль не только у нас. Немалое значение им придается за рубежом, особенно в Соединенных Штатах Америки.

Если для нас проблема надежности радиоэлектронной аппаратуры — это прежде всего проблема технического прогресса, проблема быстрого развития народного хозяйства и улучшения быта советского человека, то в США при проводимом ими агрессивном курсе внешней политики эта проблема рассматривается главным образом с точки зрения развития военной техники, с точки зрения непрерывной гонки вооружений.

По мере развития радиоэлектроники различные радиоэлектронные устройства, аппаратура и элементы начинали играть все бо́льшую роль во всех областях военной техники и вооружения. Об этом достаточно убедительно говорят следующие примеры.

Самолет-истребитель в 1941 г. имел радиоаппаратуру с 40 электронными лампами; у современного истребителя в радиоаппаратуре 600 ламп, а у бомбардировщика — 2 000 ламп.

Число одних электронных ламп, установленных в радиоаппаратуре эскадренного миноносца ВМФ США, возросло с 60 в 1937 г. до 3 000 с лишним к концу второй мировой войны.

Перед второй мировой войной радиоэлектронное оборудование одного самолета (в зависимости от типа) стоило 3 000 — 5 000 долл. В настоящее время стоимость электронного оборудования реактивного бомбардировщика достигает уже 750 000 долл.

Отметим, что до первой мировой войны (1914 г.) стоимость всего радиоэлектронного оборудования военно-воздушных сил США составляла около 4 000 долл.

Однако наряду с быстрым проникновением радиоэлектроники во все области военной техники стала обнаруживаться крайне низкая надежность многих радиоэлектронных устройств и аппаратуры. Особенно очевид-

ным это стало к концу второй мировой войны, а еще больше во время войны в Корее.

Так, 60% самолетного радиоэлектронного оборудования, переброшенного в течение второй мировой войны на Дальний Восток, оказалось неисправным.

При обследовании в 1949 г. около 70% морской радиоэлектронной аппаратуры оказалось в нерабочем состоянии.

50% радиоэлектронного оборудования выходило из строя в процессе складского хранения.

Изучение поступавших из войск в 1950—1952 гг. донесений показало, что радиосвязное оборудование находилось в нерабочем состоянии 14% времени, гидроакустическое — 48%, радиолокационное — 84%.

Послевоенные годы характеризуются дальнейшим быстрым развитием и усложнением боевой техники. Все бо́льшую роль в вооружении начинают играть управляемые снаряды, ракеты, в которых элементы радиоэлектроники являются важнейшими частями системы управления.

Особенно очевидной стала решающая роль радиоэлектроники при запуске искусственных спутников земли и баллистических ракет.

Признание решающей роли радиоэлектронной аппаратуры в современном вооружении и чувство тревоги за надежность ее работы особенно ярко выразил заместитель морского министра США по авиации Флоберг. Он писал в газете «Нью-Йорк Геральд Трибюн»:

«Мы оказались в такой зависимости от работы автоматической электронной аппаратуры для ведения современной войны, что выход из строя этой аппаратуры во время войны может привести к поражению».

Однако надежность радиоэлектронной аппаратуры имеет не только чисто военное, тактическое значение. Она имеет и весьма ощутимое экономическое значение.

Ненадежная работа применяемых в радиоэлектронной аппаратуре деталей приводила к необходимости их частой замены. По данным 1953—1955 гг. военно-морским силам США для поддержания в рабочем состоянии 160 000 единиц радиоэлектронного оборудования, находящегося на вооружении, приходилось ежегодно заменять свыше 1 млн. деталей. ВМФ держал на своих складах девять запасных ламп на каждую работающую.

В военно-воздушных силах США не удалось поднять межремонтный срок радиоэлектронного оборудования бомбардировщика выше 20 *ч*, хотя перед каждым полетом производилась проверка этого оборудования. В результате на 1 долл. стоимости самолетной аппаратуры ежегодно тратились 2 долл. на уход за нею.

Выступая в 1959 г. на пятом национальном симпозиуме (конференции) по надежности радиоэлектронной аппаратуры, представитель Министерства обороны США генерал Термен заявил, что из-за недостаточной надежности аппаратуры вооруженные силы вынуждены для обеспечения ее эксплуатации держать на своих складах на 21 млрд. долл. запасных частей и имущества, причем ежегодно стоимость этого имущества возрастает на 2 млрд. долл Во всей системе Министерства обороны каждый седьмой военнослужащий (14%) и каждый пятый вольнонаемный (20%) заняты ремонтом и профилактикой аппаратуры.

Все это привело к тому, что проблема надежности стала рассматриваться в США как важнейшая национальная проблема.

Особую заинтересованность в решении этой проблемы проявляет Военное ведомство США, тратящее на это огромные средства. К решению этой проблемы привлечены широкие круги технической общественности и крупнейшие промышленные организации.

Для выяснения причин ненадежности были произведены массовые обследования радиоэлектронной аппаратуры во многих частях сухопутной армии, ВВС и ВМФ. Обследованию подверглись тысячи единиц аппаратуры и многие сотни тысяч применяемых в них деталей и ламп. Тщательно изучались условия и особенности эксплуатации различных видов электронной аппаратуры, система ее ремонта, транспортировки и складского хранения.

В системе Министерства обороны в 1950 г. была создана специальная консультативная группа по надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Соответствующие организации были созданы и в промышленности. Так, при ассоциации промышленников, объединяющей радиоэлектронную, электротехническую и телевизионную отрасли промышленности, в 1953 г. был создан комитет, занимающийся вопросами надежности.

Отдельная секция надежности и контроля качества была создана и при Обществе радиоинженеров, играющем большую роль в развитии радиоэлектронной промышленности.

Специальные отделы, лаборатории, группы по надежности и контролю качества стали создаваться во многих промышленных фирмах и компаниях, на заводах, в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро.

Построение системы контроля надежности в различных фирмах и компаниях применяется разное. Приведем для примера построение системы контроля, принятой фирмой RCA в Кемдене.

В систему контроля фирмы RCA входят:

контроль договоров, ставящий целью обеспечить получение от поставщиков материалов и деталей продукции такого качества, которое гарантировало бы заданный уровень надежности разрабатываемой системы;

контроль системы, который ставит своей целью так влиять на этап разработки и согласования ТТЗ и ТУ, чтобы фирма могла принять выполнимые нормы надежности, являющиеся в то же время более высокими, чем нормы, предлагаемые конкурирующими фирмами;

контроль проектирования — куда относится контроль при определении нормы надежности применяемых блоков, узлов и приборов, при выборе элементов схем и режимов их использования, при расчете надежности схем, при разработке надежности системы (аппаратуры);

контроль производства, предусматривающий пооперационный контроль, контроль элементов, блоков, узлов с проверкой их конструкций на соответствие чертежам, а параметров — нормам ТУ;

предупредительный контроль продукции, предусматривающий предварительную инженерную оценку изготовленного образца и степени его надежности до предъявления его ОТК и заказчику;

контроль в полевых условиях, т. е. проверка при сдаточных испытаниях на полигоне, а также в ходе опытной эксплуатации аппаратуры

Большую роль в решении проблемы надежности играют проводимые, начиная с 1954 г, национальные симпозиумы по надежности и контролю качества. В них принимают участие как представители Министерства оборо-

ны США, так и представители всех ведущих фирм и компаний в области радиоэлектронной промышленности. На последнем, шестом, симпозиуме, происходившем в январе 1960 г. в Вашингтоне, было заслушано свыше 40 докладов, охватывающие все стороны проблемы надежности.

По каким же путям идет в США борьба за повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры?

Важнейшей предпосылкой успешной борьбы за повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры считается точное формулирование конкретных требований по надежности к каждому разрабатываемому и изготовляемому образцу аппаратуры.

В настоящее время в США во все тактико-технические требования и технические условия на разработку и изготовление различных образцов радиоэлектронной аппаратуры наряду с другими техническими параметрами обязательно включаются и конкретные количественные требования к надежности аппаратуры.

Основным количественным критерием надежности считается величина наработки на отказ, т. е. среднее число часов безотказной работы аппаратуры между двумя соседними неисправностями (отказами).

Для всей радиоэлектронной аппаратуры военного назначения консультативной группой по надежности при Министерстве обороны разработаны рекомендуемые нормы надежности.

Поскольку важнейшее значение для обеспечения заданной надежности аппаратуры имеет качество используемых в ней элементов, было принято решение разбить все элементы на группы с различным уровнем надежности в зависимости от области их применения. Уровень надежности определялся опасностью отказов, выраженной в процентах на 1 000 *ч* работы.

По рекомендации фирмы RCA все элементы были разбиты на семь групп (табл. 3).

В соответствии с принятыми уровнями надежности было определено, какие уровни элементов должны применяться в различных системах военной и гражданской аппаратуры (табл. 4).

Важнейшее значение в деле обеспечения высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры в США придают этапу ее проектирования.

Таблица 3

Уровни надежности элементов

Уровни	Условное обозначение	Опасность отказов, % на 1 000 ч	Примечание
Рыночный уровень	0	20	Элементы данного уровня применяются для изделий общего пользования, не требующих количественной оценки надежности
Низкий уровень	*R*	1,5	Элементы данного уровня применяются для изделий неответственного назначения, которые должны иметь количественную оценку надежности
Стандартный военный уровень	*S*	0,5	
Разгруженный стандартный уровень	*DS*	0,15	К этому уровню относятся элементы уровня *S*, повышение надежности которых достигнуто за счет их использования в режимах работы ниже номинальных
Верхний уровень	*T*	0,05	
Разгруженный верхний уровень	*DT*	0,01	Повышение надежности элементов *T* достигается за счет их использования в разгруженных режимах работы
Высший уровень	*U*	0,005	

Помимо выбора деталей и приборов соответствующего уровня надежности, особое внимание обращается на обеспечение нормального режима работы всех деталей в проектируемой аппаратуре.

При выборе схемы и конструкции нового образца обязательно учитывается его будущая ремонтопригодность.

Большинство фирм при проектировании аппаратуры ввело специальные испытания на надежность отдельных узлов и блоков. Особому рассмотрению на надежность подвергается и каждая разрабатываемая схема. Схема рассматривается инженерами-специалистами по надежности, которые составляют на нее специальный акт с соответствующими рекомендациями, которые являются обязательными для разработчиков.

В качестве одного из важнейших средств повышения надежности аппаратуры широко применяется метод ре-

Таблица 4

Потребные уровни надежности элементов, применяемых в различных системах

Наименование системы	Потребный уровень
Электронные вычислительные машины	*U*
Система управления огнем самолета Система управляемого снаряда	*DT*
Подвижная военная аппаратура связи Самолетная аппаратура связи Судовая аппаратура	*T*
Радиоаппаратура сантиметрового диапазона волн Портативные радиоприборы	*DS*
Широковещательные радио- и телевизионные приборы	*S*

зервирования. Разработано большое количество схем, в которых отказавшие элементы и узлы автоматически заменяются исправными.

В ходе серийного производства радиоэлектронной аппаратуры большое значение придается входному контролю элементов и деталей, строгой проверке их перед постановкой в аппаратуру, привлечению поставщиков к обязательным испытаниям всех поставляемых ими деталей и материалов.

Подразделение по надежности фирмы Юз эйркрафт компани добилось от поставщиков обязательной проверки поставляемых ими элементов и изделий с представлением специальных документов, подтверждающих проведение соответствующих испытаний. После двухлетнего применения такого метода входного контроля количество отказов, вызываемых поставляемыми изделиями, резко уменьшилось; например: по электродвигателям — с 15 до 0,2%, по потенциометрам — с 32 до 1,5%, по конденсаторам разных типов — с 26 до 1,7% и т. д.

При массовом серийном производстве аппаратуры широко используются автоматизация как при изготовлении отдельных элементов и узлов, так и при сборке и

монтаже аппаратуры, унификация и стандартизация основных элементов аппаратуры.

Очень широко поставлены организация сбора информации об отказах радиоэлектронной аппаратуры в процессе ее эксплуатации, изучение и обобщение этой информации и использование ее промышленностью.

Как в производстве, так и в эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры весьма большое значение придается статистическим методам анализа и контроля качества, которые находят очень широкое применение не только в радиоэлектронной, но и в смежных отраслях промышленности.

Очень много внимания уделяется «цене надежности», т. е. величине затрат, связанных с повышением надежности. На основе изучений накопленных за последние 5—6 лет сведений о надежности радиоэлектронной аппаратуры и затратах на ее разработку, производство и эксплуатацию установлена «удельная» стоимость разработки аппаратуры, представляющая собой сумму затрат, деленную на число ламп в разрабатываемой аппаратуре. Установлены также удельные затраты на эксплуатацию одной схемо-лампы в течение 5 лет. Эти затраты включают в себя стоимость ремонта и замененных элементов, а также содержание личного состава, занятого эксплуатацией и ремонтом аппаратуры.

Кривые таких удельных стоимостей, построенные в зависимости от величины надежности, дают возможность определить затраты на производство и эксплуатацию радиоэлектронной аппаратуры.

Конкретный пример использования этих кривых был приведен в одном из докладов на национальной конференции Общества радиоинженеров США в 1959 г.

Для примера взята наземная приемно-передающая аппаратура, имеющая 100 ламп. После разработки образцов аппаратура была изготовлена в количестве 3 000 компл. Надежность аппаратуры характеризовалась средним временем наработки на отказ, равным 300 *ч*.

Авторы показали, что при повышении наработки на отказ с 300 до 400 *ч* разработка этого типа аппаратуры обошлась бы дороже на 1,5 млн. долл. Затраты же на эксплуатацию всех 3 000 компл. аппаратуры в течение 5 лет получаются меньше на 7,5 млн. долл. Следова-

тельно, увеличение среднего времени наработки на один отказ с 300 до 400 *ч* не только экономически оправдывает связанные с этим дополнительные затраты на разработку в сумме 1,5 млн. долл., но и сбережет 6 млн. долл. в течение только 5-летней эксплуатации.

Отдельным фирмам (например, Колинз Радио Компани) удалось за последние 5 лет повысить надежность выпускаемой аппаратуры примерно на один порядок.

Однако достигнутые в США результаты не обеспечивают полного решения проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры, и поэтому актуальность ее сохраняется и на последующие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы ознакомились коротко с тем, какое значение имеет надежность радиоэлектронной аппаратуры в народном хозяйстве и быту советского человека, каковы возможные причины, вызывающие ненадежность радиоэлектронной аппаратуры, какие имеются пути повышения надежности и долговечности изделий радиоэлектронной промышленности, в каком положении находится проблема надежности за границей.

Наша радиопромышленность из года в год растет. Она выпускает в настоящее время широкую номенклатуру самых разнообразных изделий от мельчайших термисторов величиной с булавочную головку до крупнейших в мире радиоэлектронных сооружений (самого мощного в мире синхрофазотрона), необходимых для развития науки, народного хозяйства, культуры и обороны страны.

В состоянии ли мы при столь широкой номенклатуре радиоэлектронной аппаратуры и устройств и непрерывно растущей их сложности обеспечить необходимый уровень их надежности и долговечности?

Задача это сложная и требует привлечения внимания и участия всей нашей общественности. Однако она вполне выполнима для нашей промышленности.

Повышение надежности всей радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов будет значительно содействовать техническому прогрессу в нашей стране, росту благосостояния советских людей и тем самым более успешному выполнению великих задач семилетнего плана.

Цена 16 коп.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Вышли из печати следующие выпуски

И. Я. Брейдо, Ламповые усилители сигналов постоянного тока, 87 стр., тираж 50 000 (1-й завод 10 000 экз.), ц. 20 коп., вып. 384.

Г. Б. Богатов, Как было получено изображение обратной стороны Луны, 64 стр., тираж 50 000 (1-й завод 20 000 экз.), ц. 14 коп., вып. 385.

С. Е. Загик и Л. М. Капчинский, Приемные телевизионные антенны, 128 стр., тираж 140 000 (1-й завод 5 000 экз.), 27 коп., вып. 386.

С. А. Ельяшкевич, Устранение неисправностей в телевизоре, 208 стр., тираж 225 000 (1-й завод 5 000 экз.), ц. 43 коп., вып. 387.

А. И. Зиньковский, Радиотехника и космические полеты, 48 стр., тираж 38 000 экз., ц. 12 коп., вып. 388.

А. А. Корнеев и А. Н. Корнеев, Адаптеризованная гитара, 24 стр., тираж 28 000 экз., ц. 5 коп., вып. 390.

Е. К. Сонин, Портативный магнитофон на транзисторах, 32 стр., тираж 80 000 экз., ц. 7 коп., вып. 392.

Ю. Д. Пахомов, Зарубежные магнитофоны, 168 стр., тираж 45 000 экз., ц. 36 коп., вып. 393.

Справочник радиолюбителя под общей ред. А. А. Куликовского, изд. 3-е, дополненное и переработанное, 500 стр. (большой формат), тираж 200 000 экз. (1-й завод 40 000 экз.), ц. 3 р. 27 к., вып. 394.

В. Ф. Самойлов, Синхронизация генераторов телевизионной развертки, 96 стр., тираж 65 000 экз., ц. 19 коп., вып. 395.

А. Я. Глиберман и А. К. Зайцева, Кремниевые солнечные батареи, 72 стр., тираж 35 000 экз., ц. 15 коп., вып. 396.

Е. М. Мартынов, Бесконтактные переключающие устройства, изд. 2-е, дополненное, 176 стр., тираж 50 000 экз., ц. 38 коп., вып. 397.

Печатаются

С. А. Ельяшкевич, Устранение неисправностей в телевизоре, тираж 95 000 экз. (2-й завод).

Справочник начинающего радиолюбителя, под ред. Р. М. Малинина, 48 л., тираж 300 000 экз. (1-й завод 100 000 экз.).

Госэнергоиздат заказов на книги не принимает и книг не высылает. Книги, выходящие массовым тиражом, высылают наложенным платежом без задатка отделения «Книга — почтой».

Заказы можно направлять: г. Москва, В-218, 5-я Черемушкинская ул., 14, Книжный магазин № 93 «Книга — почтой».

Рекомендуем заказывать литературу только по плану текущего года. Книги Массовой радиобиблиотеки расходятся очень быстро, и поэтому выпуски прошлых лет давно уже все распроданы.

Высылку книг наложенным платежом производит также магазин технической книги № 8 «Книга — почтой», Москва, Петровка, 15.